



**Análisis de la deformación de las partículas de la arena del río  
Guamo por desgaste a través del equipo Micro – Deval.**

**Tania Julieth Rodríguez Méndez  
Paola Vanesa Rodríguez Aguirre**

**Programa de Ingeniería Civil  
Faculta de ingeniería Ambiental y Civil  
Universidad Antonio Nariño  
Bogotá D.C.**

**2023**

**Análisis de la deformación de las partículas de la arena del río  
Guamo por desgaste a través del equipo Micro – Deval.**

**Tania Julieth Rodríguez Méndez  
Paola Vanesa Rodríguez Aguirre**

**Documento presentado como requisito para optar por el título de  
Ingeniero Civil**

**Directores: Carlos Martín Molina Gallego**

**Programa de Ingeniería Civil  
Faculta de ingeniería Ambiental y Civil  
Universidad Antonio Nariño  
Bogotá D.C.  
2023**

Análisis de la deformación de la arena del río Guamo por desgaste a través del equipo Micro-Deval

*Analysis of the deformation of the Guamo river sand by attrition using Micro-Deval equipment.*

Rodríguez Méndez, Tania Julieth; Rodríguez Aguirre, Paola Vanessa

<sup>1</sup> Universidad Antonio Nariño, Colombia, trodriguez67@uan.edu.co

<sup>2</sup> Universidad Antonio Nariño, Colombia, prodriguez83@uan.edu.co

**Resumen:** Se presenta los resultados de un estudio experimental que analizó los efectos del desgaste en las propiedades de la arena del río Guamo. El objetivo del estudio fue evaluar la deformación de las partículas de arena del río Guamo por desgaste a través del equipo Micro-Deval, con el fin de medir la resistencia a la abrasión de las arenas, consiste en un tambor giratorio que contiene esferas de acero, estas esferas de acero se frotran contra las partículas de arena, lo que provoca su desgaste. Antes y después del desgaste, se realizó un análisis granulométrico de las muestras para determinar su distribución de tamaño. En este estudio, se utilizaron muestras de arena del río Guamo en condiciones húmedas y secas, donde se desgastaron durante 3100, 4650 y 6200 ciclos. Los resultados de esta investigación mostraron que el desgaste provocó una disminución del tamaño de las partículas y un aumento en la redondez de las partículas en la muestra húmeda más que en la muestra seca, el aumento de la redondez se debe a la pérdida de las esquinas y bordes de las partículas. Este análisis proporciona información sobre los efectos del desgaste en las propiedades de la arena del río Guamo. Esta información puede ser utilizada para entender de forma clara el comportamiento de este material granular.

**Palabras claves:** Desgaste, Redondez, Micro-Deval, Arena, río Guamo, deformación.

**Abstract** This article presents the results of an experimental study that analyzes the effects of wear on the properties of sand from the Guamo river. The objective of the study was to evaluate the deformation of the sand particles of the Guamo river by wear through the Micro-Deval equipment, this is an equipment that is used to measure the abrasion resistance of the sands, it consists of a

rotating drum containing steel spheres, these steel spheres are rubbed against the sand particles, which causes their wear. Before and after abrasion, a particle size analysis of the samples was carried out to determine their size distribution. In this study, sand samples from the Guamo River were used in wet and dry conditions, where they were worn for 3100, 4650 and 6200 cycles. The results of this investigation showed that the wear caused a decrease in particle size and an increase in particle roundness in the wet sample more than in the dry sample, the increase in roundness being due to the loss of particle corners and edges. This analysis provides information on the effects of wear on the properties of the Guamo river sand, this information can be used to improve the compression behavior of this granular material.

***Key words:*** Wear, Roundness, Micro-Deval, Sand, Guamo river, deformation.

## Introducción

La arena del Guamo es un material granular de calibración internacional para el uso en los laboratorios de mecánica de suelos, pavimentos y geotecnia. La importancia del uso de la arena del Guamo en los laboratorios demanda la necesidad de reconocer sus características y propiedades una de las propiedades físicas más importantes de la arena es su resistencia al desgaste. El desgaste es el proceso de pérdida de material de la superficie de un sólido debido al contacto con otro sólido, el desgaste de la arena puede suceder por una variación de mecanismo, como lo son: la abrasión, la corrosión y la erosión (García & Pérez, 2022).

El desgaste de los materiales granulares, como la arena, puede provocar una disminución de sus propiedades físicas y mecánicas. En particular el desgaste puede provocar una disminución de la adición por fricción, al perder sus caras planas y rugosas por la deformación y el aumento de la redondez de sus aristas (Forsström & Jonsén, 2016). Además, el desgaste puede provocar una disminución de la resistencia al corte y la permeabilidad de la arena, provocando un impacto significativo en la vida útil del material (García & Alonso, 2006).

Los ensayos de desgaste normalmente son usados para determinar la pérdida por fricción en presencia de agua y carga por abrasión; el cual es ejecutado mediante el equipo Micro-Deval. En el desarrollo de esta investigación se realizó un diseño experimental para el cambio de la combinación de las revoluciones en el funcionamiento del equipo de Micro-Deval mediante el medio seco y húmedo en el que se ejecutaba, simulando así el desgaste de la arena. El equipo de Micro-Deval consiste en un cilindro giratorio que contiene en su interior unas esferas de aluminio, las cuales actuaron como una carga externa, con el fin de poder evaluar el desgaste de la arena al ser sometida a tres ciclos en el Micro-Deval.

### **Planteamiento del problema**

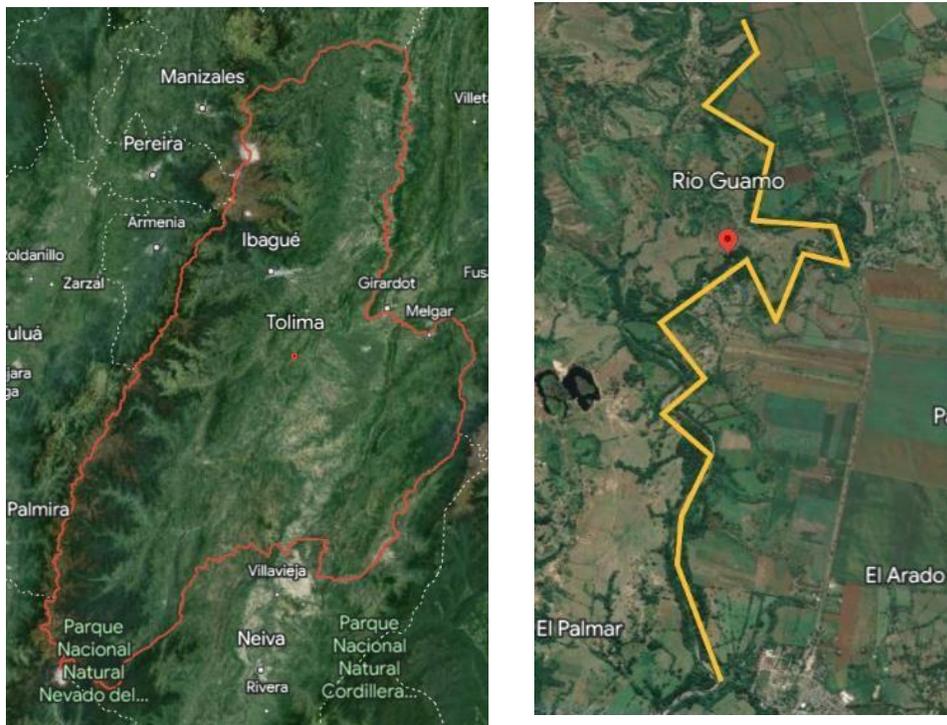
Las propiedades morfológicas son de suma trascendencia en el comportamiento físico del material granular. Las propiedades y características mecánicas de la arena, incluyendo compactación, densidad de empaquetamiento, entre otros, se logran ver afectados por el tamaño y forma de las partículas, la arena al ser un componente principal del concreto y otros materiales de ingeniería, se le debe tomar en cuenta el tamaño y forma, ya que son relevantes para las características mecánicas de estos materiales (Xie et al, 2020).

Por lo anterior, el tamaño y la forma de las partículas son importantes para la evaluación del comportamiento y las características de los materiales granulares, sus propiedades más importantes son la forma, la redondez y la textura superficial, las cuales son propiedades independientes, ya que cualquiera de estas propiedades puede variar sin tener afectación entre ellas (Arasan et al, 2011). La morfología de las partículas se deforma, no solo al inducir el desgaste, sino también debido al desgaste natural por erosión, afectando su forma y características de grano, originando imperfecciones y fragilidad en la partícula.

Para llevar a cabo esta investigación, se utilizará arena del río Guamo, se formó a partir de los abanicos del Guamo, que son depósitos de arenas de origen volcánico (volcán Machín) (Vargas et al, 2022), ubicado en el departamento del Tolima (Figura 1). En el laboratorio de ingeniería civil de la universidad Antonio Nariño, sede circunvalar, se llevarán a cabo pruebas de desgaste inducido para evaluar el cambio en el comportamiento físico del material.

**Figura 1.**

*Localización geográfica del departamento del Tolima y el Río Guamo*



**Nota:** Modificado de (Google Earth, 2023).

A raíz de la información descrita, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el impacto del desgaste en la deformación de las partículas de la arena del río Guamo y de qué manera este cambio afecta el comportamiento físico a través de la aplicación del ensayo Micro-Deval?

### **Estado del arte**

En la investigación (Cho et al, 2006), la redondez, la esfericidad y la suavidad caracterizan la forma de las partículas. Estos datos corroboran que el aumento de la angularidad o la excentricidad conduce a aumentos en el máx. y e min. Además, los resultados reflejan cómo el aumento de la irregularidad de las partículas conduce a una disminución de la rigidez, pero a una mayor sensibilidad a los estados de tensión, mayores ángulos de fricción para estados críticos y mayores intersecciones de líneas de estado crítico; de modo que, la forma del grano se convierte en una importante propiedad indicadora del suelo, que debe caracterizarse y documentarse adecuadamente, especialmente en arena y grava limpias. Un estudio detallado de la forma de las

partículas dará como resultado un mejor entendimiento del comportamiento de la arena. Además, se propone un nuevo mapa de clasificación para comparar y detallar la forma de las partículas y la dimensión fractal. Las metodologías presentadas por los autores tienen como propósito establecer la estandarización de la clasificación de las partículas debido a su forma por medio de la Figura 8. Determinación forma de partículas esfericidad y redondez.

Según la investigación presentada por (Arasan et al, 2011) la dimensión fractal consiste en la medición del cuerpo de las arenas y las propiedades de forma de las partículas, que se establecen mediante análisis de imágenes. En esta investigación se describe la relación exponencial entre la dimensión fractal y la redondez, esfericidad, angularidad y convexidad. También, se presenta un conjunto de correlaciones empíricas que demuestran claramente el vínculo entre la dimensión fractal y las propiedades de forma de las partículas.

La forma de partículas de arena naturales mediante análisis de imágenes 2D y Caracterización 3D del tamaño. En este estudio realizado por (Xie et al, 2020), se desarrolló una estructura que combina análisis de imágenes y escaneo láser 3D y se aplicó a 20 granos de arena natural. Los resultados muestran que las propiedades morfológicas tridimensionales, incluido el tamaño (longitud, anchura, grosor, volumen y área superficial) y la forma (alargamiento, planitud y esfericidad), se pueden estimar utilizando propiedades morfológicas bidimensionales. Proponen un método práctico para obtener información significativa de los granos de arena a partir del análisis de imágenes 2D.

Hasta la fecha, los estudios que se han realizado para conocer la forma de las partículas han sido bidimensionales, y para evaluar el tamaño el estudio más común es el tamizado. Este estudio de (Fonseca et al, 2012), utilizó herramientas tecnológicas de imágenes tridimensionales para caracterizar las propiedades internas del suelo, incluida la cuantificación de la morfología de partículas. Las medidas morfológicas se compararon con datos tamizados y las medidas se obtuvieron utilizando un sistema láser basado en imágenes 2D. El tamaño del tamiz demostró tener una buena correlación con la longitud del eje principal intermedio. La ruptura de granos agrietados, a lo largo de brechas existentes, ocurre tanto durante la reconstitución como durante el corte de suelos intactos, un fenómeno que no se puede observar utilizando técnicas invasivas como el análisis de tamizado.

Se llevaron a cabo por (Kim et al, 2021) una serie de simulaciones 3D mediante el método del elemento diferencial (DEM) de ensayos triaxiales de deformación plana para la investigación del efecto de la forma del grano en el comportamiento físico de los materiales granulares. Con base en el factor de desigualdad de forma (FU) como factor de forma, se generaron seis tipos de elementos aglomerados con diferentes ángulos microscópicos utilizando dos o cuatro elementos esféricos. Utilizaron los valores de FU para examinar el ángulo de fricción interno máximo movilizado, la formación de bandas de corte y la anisotropía estructural en función del tensor tisular principal. Se encontró que el máximo ángulo de fricción interna movilizado tenía una correspondencia lineal con el valor de FU. A medida que aumenta el valor de FU, la forma del grano se vuelve más esférica y las bandas de corte aparecen menos pronunciadas. También se encontró que la anisotropía estructural depende del valor de FU ya que el espécimen con el mayor valor de FU indujo más anisotropía estructural. En conclusión, FU como factor de forma puede ser un principio para determinar el efecto de la forma del grano en el comportamiento físico de los materiales granulares.

En este estudio (Vallejo & Zhou, 1995), se realizó un análisis fractal de los perfiles de partículas bidimensionales estándar de Krumbein. Se encontró que existe una relación entre la dimensión fractal (D) y el número de redondez de Krumbein (R).

La forma de los materiales granulares puede describirse de dos maneras: mediante su dimensión fractal (D) o mediante el número de redondez de Krumbein (R). La dimensión fractal es una medida de la autosimilitud de un objeto, mientras que el número de redondez de Krumbein es una medida de la redondez de un objeto.

Esta investigación (López & Buey, 2010), utilizó un método llamado descriptores de Fourier para cuantificar la forma de las partículas en materiales geológicos. El método de descriptores de Fourier se basa en el análisis digital de imágenes, lo que permite medir parámetros como la esfericidad, la elongación y la orientación.

El análisis comparó los resultados obtenidos mediante el enfoque de descriptores de Fourier con los métodos convencionales de descripción de la morfología de partículas. Los hallazgos indicaron una fuerte tensión entre la eficiencia según la definición de Krumbein, la relación entre los ejes de las partículas y el valor del primer descriptor de Fourier.

Los autores concluyen que el método de descriptores de Fourier es una herramienta útil para cuantificar la forma de las partículas en materiales geológicos.

Este documento (Carmona Álvarez, 2019) analiza la relación entre los recursos informáticos que simulan los fenómenos físicos y el comportamiento de la arena en la construcción de especímenes para laboratorios de mecánica de suelos. Una de las técnicas de construcción más comunes, la pluviación, simula la depositación natural del material particulado. Al poder reconstruir los especímenes de forma natural, se puede predecir la capacidad de compactación de un suelo granular.

## **Marcos referencias**

### **Marco conceptual**

#### **Granulometría**

La granulometría es un proceso de laboratorio, la cual determina la proporción en la que intervienen los granos de suelo, en función de su tamaño (Araújo et al, 2015), se suele llamar degradación del suelo. La separación del suelo en diferentes segmentaciones, según su tamaño, es necesario para conocer su competencia y eficiencia en una mirada geotécnica. Para esto se lleva a cabo un proceso de tamizaje como se observa en la Figura 2, para las partículas gruesas-finas (gravas y arenas) (Cárdenas Ramírez & Moya Ortiz, 2022).

### **Figura 2.**

*Ensayo de granulometría*



**Nota:** Tamizaje de la muestra (Fuente propia).

### **Ensayo Micro-Deval**

Este ensayo (Figura 3), evalúa la resistencia a la abrasión y a la durabilidad de agregados. Este análisis implica la acción combinada de abrasión y molienda de la muestra.

**Figura 3.**

#### *Ensayo Micro-Deval*



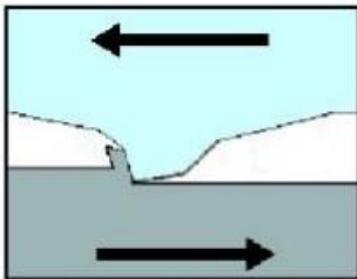
**Nota:** Introducción al recipiente cilíndrico la muestra, carga abrasiva y agua (INVIAS, 2012).

#### *Desgaste abrasivo*

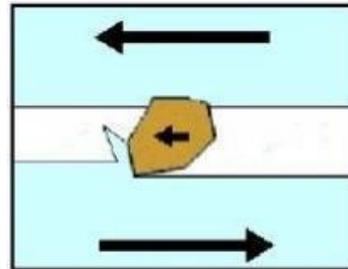
El desgaste abrasivo se refiere a la reducción de la masa de un material como resultado de la interacción entre partículas o superficies duras que se desplazan a lo largo de una superficie. Existen dos categorías principales de desgaste abrasivo: el desgaste abrasivo a dos cuerpos y el desgaste abrasivo a tres cuerpos. En el desgaste abrasivo a dos cuerpos (Figura 4a), la abrasión suele ser causada por las asperezas duras que interactúa con la superficie de contacto. Por otro lado, en el desgaste abrasivo a tres cuerpos (Figura 4b), el desgaste es resultado de partículas duras que se encuentran en movimiento entre las superficies en cuestión (David, 2016).

**Figura 4.**

*a. Desgaste a dos cuerpos*



*b. Desgaste a tres cuerpos*



**Nota:** Fuente (David, 2016)

El desgaste abrasivo se puede clasificar en tres categorías, esta clasificación se realiza según el esfuerzo de trabajo al que suelen estar sometidas las superficies en contacto (Widder et al, 2023). En la abrasión de bajo esfuerzo las partículas suelen deslizarse sobre otra superficie, en el caso de abrasión severa, estas abrasiones se pueden considerar dentro de un grupo de alto esfuerzo, en el cual con facilidad se puede observar las ranuras o surcos, así como el desplazamiento del material (López, 2004).

### Suelos

El suelo tiene una gran variedad de definiciones, pero la más acertada dentro del campo de Ingeniería Civil es aquella donde el suelo es un sustrato físico sobre el que se lleva a cabo diversas obras, en el cual son de gran importancia algunas propiedades físico- químicas y mecánicas, es considerado como multifase, ya que, está compuesto de sólidos, líquidos y gases (Onyelowe et al., 2023). Entre las variables de identificación son los más relevantes la granulometría y la plasticidad.

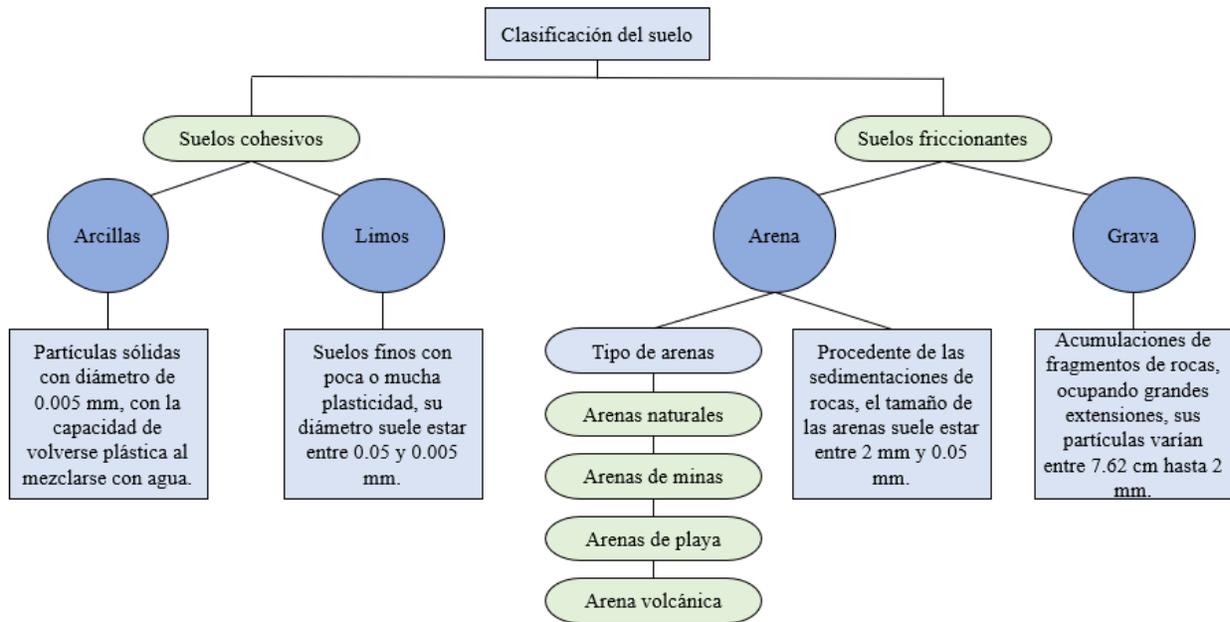
El tamaño de las partículas va desde los granulares conocidos como grava y arena, hasta las partículas finas conocidas como arcillas y limos (Cruz & Luis, 2013).

### *Clasificación de los suelos*

Debido a la alta variedad de suelos en la naturaleza, la mecánica de suelos ha desarrollado varios sistemas de clasificación (Gerasimova & Konyushkov, 2023). Cada uno de estos métodos se utilizó en situaciones específicas, dependiendo de las necesidades y aplicaciones que lo fundamentan. Algunos ejemplos de estos métodos son la clasificación de la Asociación Americana de Funcionarios de Caminos Públicos (AASHTO), la clasificación de la Administración de aeronáutica Civil (CAA) y el Sistema Unificado de clasificación de Suelos (SUCS). La diversidad en la clasificación de suelos se debe a que estos son evaluados de distintas maneras por ingenieros civiles, geólogos y agrónomos. Sin embargo, independientemente del enfoque de análisis, es fundamental que cualquier método de clasificación se base en las propiedades mecánicas del suelo, ya que estas propiedades son de gran importancia en varios campos de la ingeniería (Villalaz, 2004). De manera concreta y resumida podemos ver en la Figura 5, la clasificación de los suelos de forma general, abarcando la conjunción de los diversos métodos usados.

### *Figura 5.*

*Diagrama general de la clasificación de suelos*



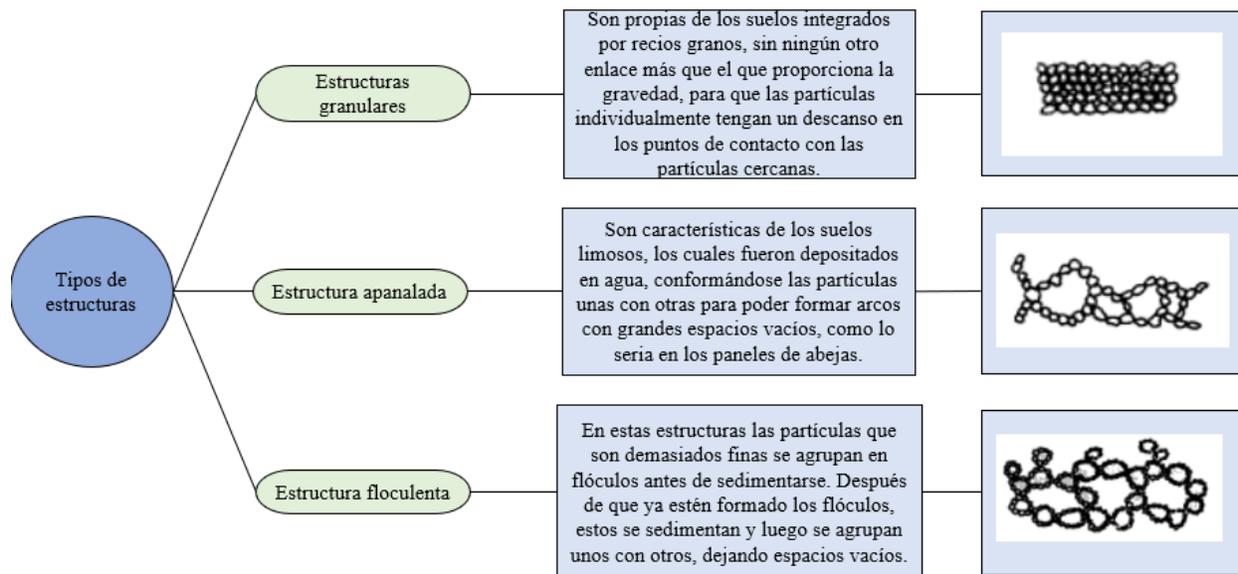
**Nota:** Fuente (Villalaz, 2004).

## Estructura

Los suelos están compuestos por numerosos elementos con una variedad de composiciones minerales, tamaños y formas. Estos elementos forman la estructura del suelo, que se puede categorizar en tres tipos: granulares, en forma de panel y floculenta, como se ilustra en la Figura 6 (Villalaz, 2004).

### **Figura 6.**

*Diagrama de la clasificación de estructuras.*



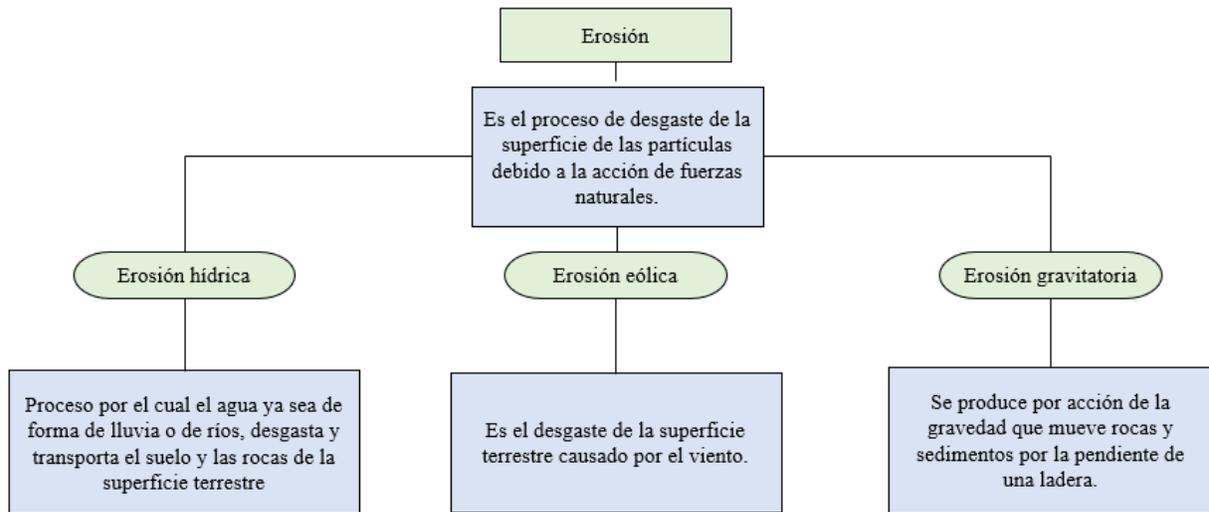
**Nota:** Fuente (Villalaz, 2004).

### Descomposición física del suelo

La descomposición física del suelo según (Kölbl et al, 2006), es el proceso por el cual los agregados del suelo se rompen en partículas más pequeñas. Este proceso es impulsado por una serie de factores, que incluyen la actividad biológica, las fuerzas mecánicas y las características físicas del suelo. Es importante para la estructura y función del suelo, ya que, los agregados proporcionan estabilidad al mismo, mejorando la aireación y la retención de agua. En la Figura 7 se muestra el concepto de descomposición por erosión.

**Figura 7.**

*Diagrama concepto de erosión*



**Nota:** Fuente de (Riquetti et al, 2023).

## Marco teórico

El tamaño y forma de las partículas pueden reflejar la composición del material, la formación del grano, el transporte y los entornos de depósitos. La forma del grano se puede determinar mediante los procesos mecánicos y químicos, la acción química y la abrasión aumentan con la edad y con ello las arenas más viejas tienden a ser más redondas, esto independiente al tamaño que pueda tener la partícula, lo que puede depender del tamaño de esta partícula son sus imperfecciones y la fragilidad que esta pueda tener, entonces, entre más grande sea la partícula tiende a ser más imperfecta y de fractura frágil, en el caso contrario, la partícula más pequeña suelen ser las más fuertes, debido a la carencia que esta tiene de imperfecciones (Cho et al, 2006).

La forma de los materiales consiste en la esfericidad, la redondez y la textura superficial (Zhang et al, 2020). Cuando se habla de la esfericidad, se refiere a la configuración general que tienen las partículas con tendencia a la forma de una esfera, mientras que la redondez es la que mide la nitidez en las esquinas de las partículas, es decir, su mayor o menor número de aristas, por último, la textura de la superficie es la que engloba características de micro relieve; todo el daño superficial que se evidencia o pudo tener la partícula. Estos aspectos logran tener una gran influencia en el

comportamiento físico de los materiales granulares, afectando su resistencia al cizallamiento, densidad, compresibilidad, y su poder erosivo, entre otros. Debido a estos efectos es muy importante tener en cuenta la forma, por cuanto es una característica relevante en el comportamiento físico de estos materiales (Vallejo & Zhou, 1995).

La esfericidad es una medida de la redondez de un objeto. La esfericidad se puede definir matemáticamente según la ecuación de Wandell (Ecuación 1), se puede cuantificar como el diámetro de la esfera dibujada más grande en relación con el diámetro de la esfera acotada más pequeña. (Cho et al, 2006).

$$sphericity = \frac{r_{max-in}}{r_{mi-cir}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

$r_{max-in}$  es el radio mayor interior de la partícula

$r_{mi-cir}$  es el radio menor interior de la partícula

La redondez es una medida de la erosión de los bordes de la partícula, para esta variable no existe una única fórmula matemática, para ello se han propuesto numerosas definiciones numéricas, pero algo en común que tienen todas ellas, es que tratan de relacionar el radio de curvatura, el tamaño de las protuberancias o angulosidades de la partícula con el radio o diámetro de la esfera, como se muestra en la ecuación 2 (López & Buey, 2010).

Aplicando la ecuación de Wandell para la redondez, donde es el cálculo del radio medio de curvatura de las características superficiales, en relación con el radio de la esfera máxima.

$$R = \frac{\sum r_i}{N r_{\max-in}} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

**ri:** es el radio de los círculos

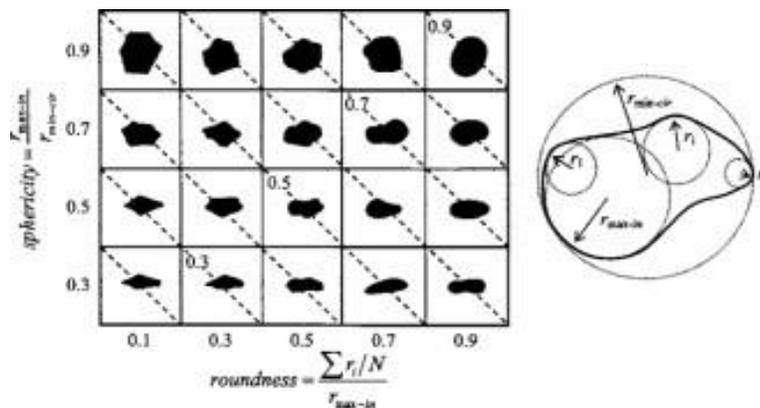
**N:** la cantidad de círculos i

**r max-in:** es el radio máximo

La angularidad de las partículas de suelo hace referencia a la variación de las esquinas de una partícula que incide en su tamaño. El valor de la angularidad se obtendrá según la tabla de clasificación de la Figura 8, la cual es proporcionada por Krumbein y Sloss. Con los cálculos de redondez ubicados en el eje “x” y los de esfericidad ubicados en el eje “y”, nos dará la forma y angularidad de estas partículas.

**Figura 8.**

*Gráfico de determinación de la forma y angularidad de las partículas.*



**Nota:** Fuente (Cho et al 2006).

La granulometría es una prueba de laboratorio que se utiliza para determinar el tamaño y la distribución de las partículas de un suelo. Se calcula a continuación, con las ecuaciones 3 y 4 (INVIAS,2007).

$$\text{Peso retenido (g)} = \text{peso material retenido en el tamiz} \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{Peso retenido (g)}}{\sum \text{peso retenido (g)}} \quad \text{Ecuación 4.}$$

$$\% \text{ Retenido acumulado} = \% \text{ retenido acumulado} + \% \text{ retenido} \quad \text{Ecuación 5.}$$

$$\% \text{ Pasa} = 100 - \% \text{ retenido acumulado} \quad \text{Ecuación 6.}$$

Para poder saber las características de la curva granulométrica se utiliza lo coeficiente de uniformidad (Ecuación 7), coeficiente de curvatura (Ecuación 8) y el módulo de finura (ecuación 9) de las muestras de arena.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \text{Ecuación 7.}$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} * d_{60}} \quad \text{Ecuación 8.}$$

$$\mu_f = \frac{\sum \% \text{ retenido acumulado}}{100} \quad \text{Ecuación 9.}$$

El ensayo MICRO-DEVAL tiene como objetivo desgastar las partículas, para determinar la pérdida que sufrió el agregado fino debido a la abrasión. Los resultados de este ensayo son útiles para determinar la resistencia que tiene el agregado fino sometido a desgaste, también nos ayuda a determinar la proporción de materiales débiles y blandos dentro del agregado fino. Para determinar la pérdida por abrasión del agregado fino por el equipo MICRO-DEVAL se calcula por medio de la Ecuación 10 (INVIAS, 2012).

$$\text{Porcentaje de perdida} = \frac{Pa - Pb}{Pa} * 100$$

Ecuación 10.

Donde

**Pa:** Peso inicial

**Pb:** peso final.

## Marco normativo

**Tabla 1.**

*Normativa para la investigación*

Tipo de ensayo	Descripción	Normativa
<b>Angularidad</b>	Precisar el ángulo de los agregados finos	ASTM C 1252-03 (ASTM, 2003).
<b>Granulometría</b>	Los materiales se clasifican por tamaño de partícula.	INVE-123-07 (INVIAS, 2007).
<b>Micro-Deval</b>	Describe un procedimiento para medir la resistencia a la deformación por desgaste de una muestra de agregado fino empleando el equipo Micro-Deval.	INV E – 245 – 13 (INVIAS, 2012). ASTM D 7428-08 (ASTM, 2008)

**Nota:** Elaboración propia.

## **Objetivos.**

### **General**

Demostrar la deformación que experimentan las partículas de arena del río Guamo a través de una simulación de desgaste en el equipo Micro-Deval, analizando los cambios morfológicos resultantes, con el fin de comprender mejor su impacto en las propiedades mecánicas de este material.

### **Específicos**

- Realizar ensayos en el equipo Micro-Deval en muestras de arena del río Guamo para simular el proceso de desgaste y registrar los cambios morfológicos de las partículas antes y después del ensayo.
- Identificar las propiedades morfológicas de la muestra de arena del río Guamo, realizando un análisis detallado mediante el software AutoCAD de la forma, tamaño y características superficiales de las partículas antes y después de ser sometidas al desgaste.
- Comparar los resultados de la muestra de la arena antes y después de ser sometidas al desgaste, observando los cambios en su morfología con el microscopio de la marca QUIMICOMPANY.

## Metodología

La problemática y los objetivos planteados en esta investigación tienen como propósito llevar a cabo la metodología propuesta en la (Figura 9), para la estimación del desgaste de los materiales friccionantes usados en geotecnia. La metodología permite estimar los cambios físicos de las partículas por medio del desgaste, empleando el equipo de laboratorio Micro-Deval, su función fue determinar la resistencia al desgaste de agregados, permitiendo analizar formas, cambios y deformaciones en cada una de las partículas; y así obtener datos de redondez y esfericidad en un intervalo de tiempo determinado.

Para dar cumplimiento al propósito de esta investigación se proponen desarrollar 3 etapas, las cuales se describen a continuación.

### **Etapas 1: Primera fase de laboratorio.**

Para analizar detalladamente el tamaño, forma y características superficiales, así como los cambios morfológicos que sufren antes y después de ser sometidas al desgaste a través del equipo Micro-Deval, se plantea realizar las siguientes actividades:

1. El ensayo granulométrico: Permite obtener valores de la curva granulométrica, que representan las características de las arenas.
2. Laboratorio microscopio: El equipo utilizado es de la marca QUIMICOMPANY, el resultado de esta actividad es un registro foto micrográfico del material.
3. Ensayo Micro-Deval: la máquina utilizada es de la marca E &G modelo MD-700, proporcionar el porcentaje de desgaste y tipo de gradación

### **Etapas 2: Segunda fase observación morfológica.**

Para comparar y observar los cambios morfológicos de las muestras de arena antes y después del desgaste abrasivo, y así evidenciar la contribución que tiene en el comportamiento físico de los materiales, se plantea realizar las siguientes actividades:

1. Digitalización de las partículas, mapa digital en 2D de las partículas.

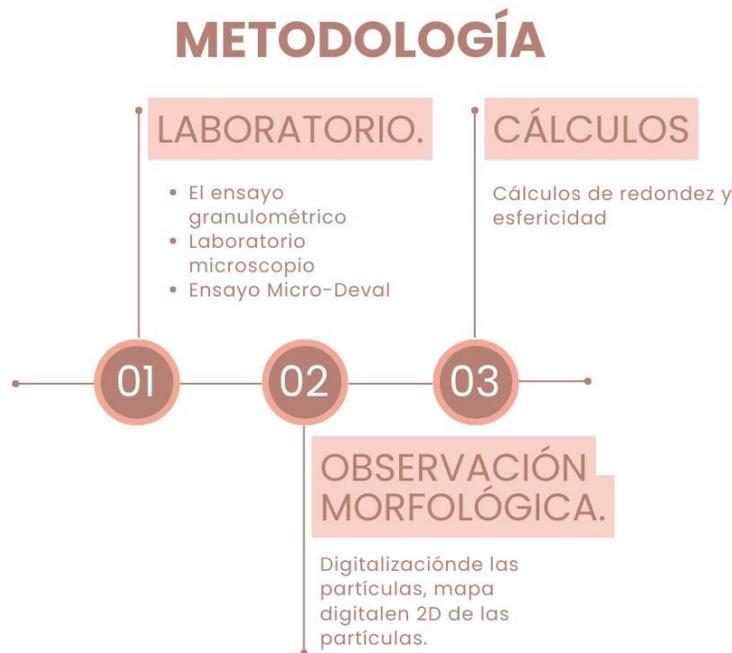
## Etapa 3: Cálculos

Determinar el desgaste de las partículas de la arena del río Guamo mediante ensayos de desgaste realizados con el equipo Micro-Deval, para ello se plantea realizar la siguiente actividad:

1. Cálculos de redondez y esfericidad, con el propósito de demostrar el cambio morfológico antes y después del desgaste por abrasión.

**Figura 9.**

*Diagrama metodología*



**Nota:** Elaboración propia.

### Recolector de información

Para el desarrollo de la recolección de las muestras a usar en el presente trabajo se tuvo en cuenta una serie de procesos en cada etapa mencionada de la metodología, para así poder determinar la deformación que sufren las partículas antes y después de someterlas al desgaste abrasivo a través del equipo Micro-Deval.

### Granulometría

Se selecciona tamices en el orden de N° 10, 16, 20, 30, 40, 50, 60, 100 y 200. Se elabora este ensayo antes de la deformación, tomando cinco pruebas como se puede observar en la Tabla 2, con un peso total de 500 g y para el ensayo de desgaste que se hará a través del equipo Micro-Deval se tomara un peso de 500 g, con la arena en condiciones seca y húmeda.

En la Figura 10, se muestra cómo se tomó el peso inicial y retenido de las muestras en cada abertura de los tamices seleccionados, también se contó con brocha para limpiar bien los tamices y en lo posible no dejar residuos de muestras en estos

#### *Figura 10.*

*Elementos usados durante el ensayo de granulometría.*



**Nota:** Elaboración propia

### Micro-Deval

Para el ensayo de Micro-Deval se adquirieron tres datos de ciclos: 3100, 4650 y 6200, en cada una de ellas se hicieron dos ensayos, uno con la arena seca y el otro con la arena húmeda, el peso inicial de estas arenas fue de 500 g, también tomando la carga abrasiva con un peso de 1666 g, como se observa en Figura 11, teniendo cada uno de estos materiales preparados, se introducen en el equipo con sus respectivas revoluciones, una vez realizado el ensayo como se ilustra en la Figura 12, se procede a cada muestra de arena tomarle su respectiva granulometría. Para las muestras húmedas, se dejan en el horno durante 72 h para que la muestra este totalmente seca, una vez, secas se procede con el ensayo de granulometría.

**Figura 11.**

*Preparación de material*

a. *Pesaje inicial para el ensayo Micro-Deval.*



b. *Pesaje de la carga abrasiva utilizada.*



c. *Muestra húmeda*

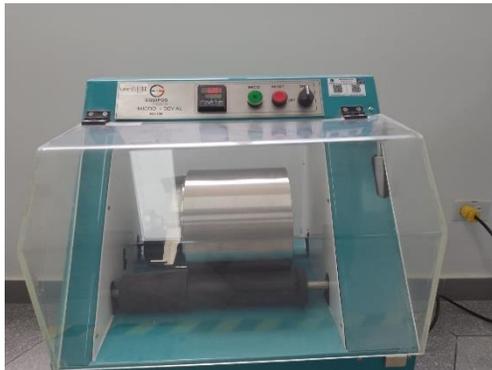


**Nota:** Se observar los pesajes iniciales de la carga abrasiva utilizada, también de la arena en condiciones seca y húmeda.

**Figura 12.**

*Ensayo Micro-Deval para las muestras de arena en condiciones secas y húmedas*

a. *Equipo Micro-Deval funcionando a 6200 ciclos.*



b. *Muestra húmeda después de los 6200 ciclos.*



c. *Muestra seca después de los 6200 ciclos.*



**Nota:** se observan las revoluciones usadas para el ensayo del Micro-Deval y como queda el tambor después del ensayo

### **Proceso de fotomicrográfico de las partículas**

Una vez realizados y terminados los ensayos anteriores se procede a la toma de muestras, esto se elabora mediante el ensayo de granulometría, se toman estas muestras una vez se realizaba los procesos de pesaje en cada abertura de los tamices realizados, este proceso se desarrollaba mediante una cinta de adhesiva donde se toman porciones de cada muestras de la arena y se pone sobre esta cinta, para iniciar con el laboratorio de microscopio como se evidencia en la Figura 13,

donde se tomaba el registro fotomicrográfico de las partículas, obteniendo así doce muestras después del ensayo del Micro-Deval.

### **Figura 13.**

#### *Toma de muestras*

a. *Toma de muestras después del ensayo Micro-Deval en condición seca.*



b. *Fotomicrográfico de la muestra de las partículas.*



**Nota:** Se observa cómo se recolecto las muestras teniendo en cuenta el proceso anterior descrito.

#### **Procesamiento de datos o información**

Después de la obtención de las muestras, se procede a digitalizar en AutoCAD las fotomicrografías obtenidas en el ensayo de microscopio Figura 12, con el fin de poder obtener así los datos de sus radios para los cálculos de redondez, esfericidad y angularidad, esto consta de los siguientes pasos

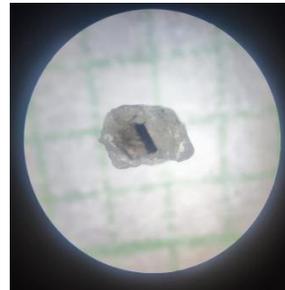
- Se desarrolla una cuadrícula de 1mm por lado de cuadro.
- En la cuadrícula se ubica la fotomicrografía de la partícula del material seleccionada.
- Se digitaliza y delinea el contorno de cada partícula tomada.

- Una vez digitalizada la partícula se traza las circunferencia interna y externa de cada partícula.

**Figura 14.**

*Digitalización de las partículas de arena del río Guamo*

*a. Fotomicrográfico de las partículas de arena del río Guamo*



*b. Mapeo de las fotomicrográfico en el software AutoCAD*



**Nota:** Se observa la toma de fotos fotomicrográficas, y su mapeo desde el software AutoCAD.

## Resultados

### Granulometría.

Se tomaron 500g de muestra para el análisis granulométrico, antes y después de someterla a desgaste en condiciones húmedas y secas. Los resultados de este análisis para cada muestra se muestran a continuación.

#### Antes de ser sometida al desgaste

En el marco de un estudio sobre los efectos del desgaste en la granulometría de la arena del río Guamo, se realizaron cinco ensayos de granulometría de muestras de arena antes de que estas sean sometidas al desgaste. Los resultados de los ensayos se muestran a continuación:

**Tabla 2.**

*Granulometría de la arena del río Guamo antes del desgaste*

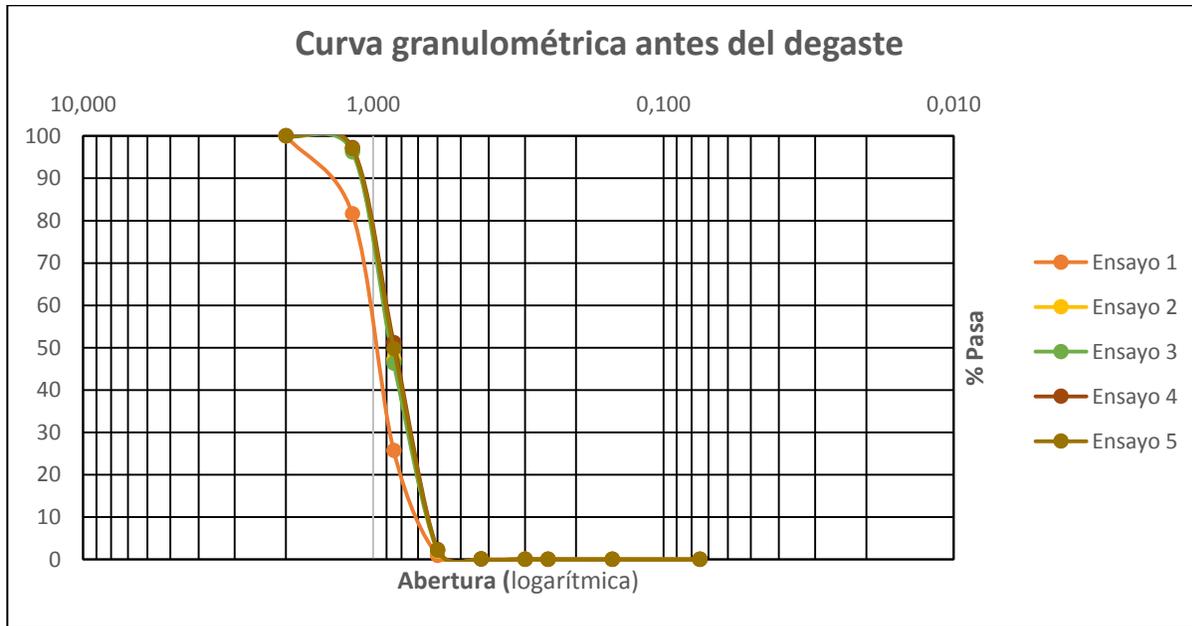
Tamiz		Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5	
Abertura		Porcentaje %		Porcentaje %		Porcentaje %		Porcentaje %		Porcentaje %	
N°	(mm)	Retenido	Pasa								
10	2.000	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
16	1.180	18.41	81.59	3.46	96.54	3.77	96.23	3.77	97.24	3.00	97.00
20	0.850	55.90	25.69	49.30	47.23	49.89	46.34	49.89	51.20	47.22	49.78
30	0.600	24.74	0.95	45.26	1.97	44.25	2.09	44.25	2.35	47.62	2.17
40	0.425	0.84	0.10	1.91	0.06	2.01	0.08	2.01	0.08	2.10	0.06
50	0.300	0.03	0.07	1.91	0.02	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.02
60	0.250	0.06	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
100	0.150	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
200	0.075	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Fondo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Total</b>	100.00		100.00		100.00		100.00		100.00	

**Nota:** Elaboración propia.



**Figura 16.**

*Curva granulométrica antes del desgaste.*



**Nota:** Se puede observar las gráficas de granulometría de los cinco ensayos antes del desgaste.

En las Tablas 3 y 4 se muestran los diámetros efectivos en mm de las muestras de arenas antes de someterlas al desgaste. Estos diámetros se pueden observar en la Figura 15, junto con los coeficientes de uniformidad, coeficiente de curvatura y módulo de finura.

**Tabla 3.**

*Diámetros efectivos para las muestras antes del desgaste.*

Diámetros efectivos	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
d10	5.01	4.47	4.37	4.27	4.37
d30	7.24	5.62	5.75	5.37	5.50
d60	10.00	8.13	8.32	7.76	7.94

**Nota:** Elaboración propia.

**Tabla 4.**

*Características de la curva granulométrica de la arena antes del desgaste.*

Características	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Cu	2.00	1.82	1.91	1.82	1.82
Cc	1.05	0.87	0.91	0.87	0.87
Mf	6.92	6.54	6.55	6.49	6.51

**Nota:** Elaboración propia.

### Después de ser sometidas al desgaste en condición seca

Se tomaron 500g de muestra de arena de río Guamo en condiciones seca y se llevaron al equipo Micro-Deval con una carga de 1666g de esferas de acero. Los ensayos se realizaron en los ciclos 3100, 4650 y 6200. Una vez finalizado cada ensayo, se realizó un análisis granulométrico de la arena desgastada, utilizando los tamices mencionados. Los resultados se muestran a continuación:

**Tabla 5.**

*Granulometría de la arena del río Guamo en condiciones secas después del ensayo de Micro-Deval.*

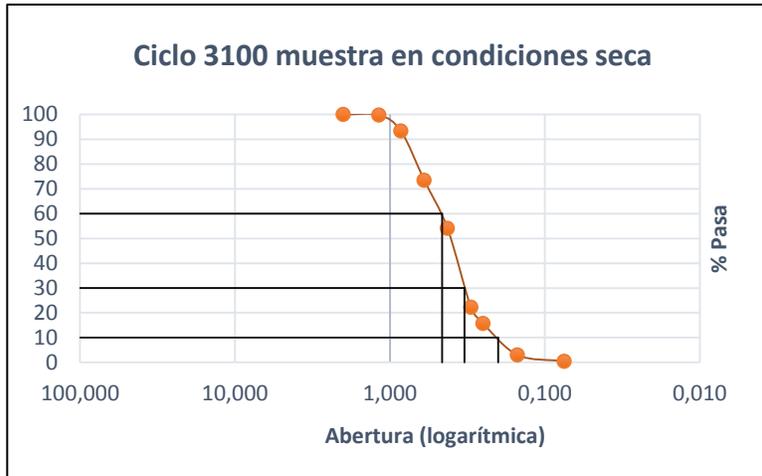
Tamiz		3100 seca		4650 seca		6200 seca	
Abertura		Porcentaje %		Porcentaje %		Porcentaje %	
Nº	(mm)	Retenido	Pasa	Retenido	Pasa	Retenido	Pasa
10	2.000	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
16	1.180	0.22	99.78	0.17	99.83	0.09	99.91
20	0.850	6.44	93.34	4.65	95.18	2.96	96.95
30	0.600	19.86	73.48	15.59	79.59	12.68	84.27
40	0.425	19.37	54.11	20.00	59.59	27.31	56.96
50	0.300	31.85	22.26	33.82	25.77	40.04	16.92
60	0.250	6.53	15.73	8.59	17.18	3.07	13.85
100	0.150	12.73	3.00	13.79	3.39	11.17	2.68
200	0.075	2.52	0.48	3.01	0.38	2.39	0.29
	Fondo	0.48	0.00	0.38	0.00	0.29	0.00
<b>Total</b>		100.00		100.00		100.00	

**Nota:** Elaboración propia.

**Figura 17.**

*Curva granulométrica después del desgaste de cada ensayo de arena en condición seca.*

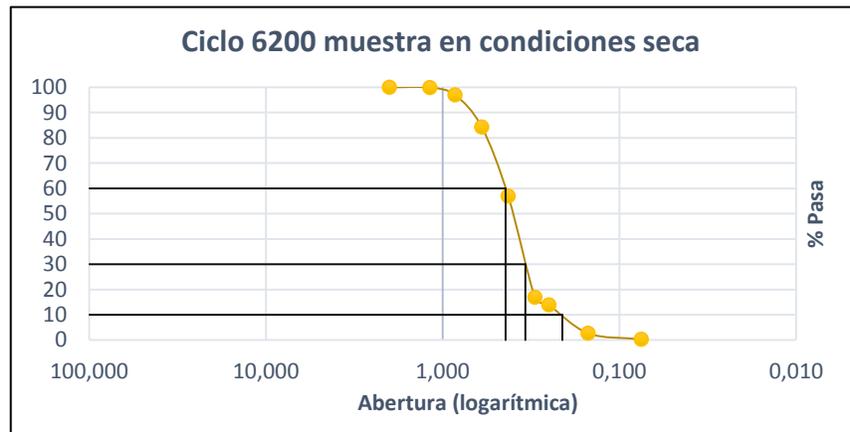
**a.**



**b.**



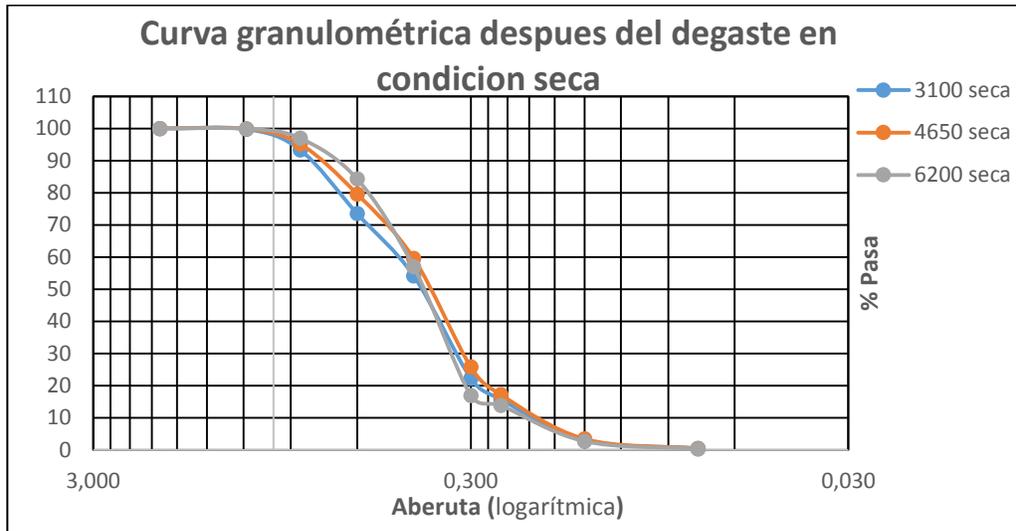
**c.**



**Nota:** Se puede observar la curva granulométrica de cada ensayo echo después del desgaste con arena en condición seca, con sus respectivas líneas mostrándonos los diámetros efectivos d10, d30 y d60.

**Figura 18.**

*Curva granulométrica de la arena del río Guamo en condiciones secas después del ensayo de Micro-Deval.*



**Nota:** Se puede observar las gráficas de granulometría de los 3 ensayos después del desgaste.

En la Tabla 6 se muestran los diámetros efectivos en mm de las muestras de arena después del ensayo en el equipo Micro-Deval con muestras de arena en condiciones secas. Estos diámetros se pueden observar en la Figura 18.

**Tabla 6.**

*Diámetros efectivos para las muestras en condición seca después del desgaste*

Diámetros efectivos	Ciclos		
	3100	4650	6200
d10	1.58	1.62	1.58
d30	2.14	2.19	2.09
d60	2.88	2.75	2.63

**Nota:** Elaboración propia.

En la Tabla 7 se muestran los coeficientes de uniformidad, coeficiente de curvatura y módulo de finura para cada uno de los ensayos.

**Tabla 7.**

*características de la curva granulométrica de la arena en condición seca después del desgaste*

características	ciclos		
	3100	4650	6200
Cu	1.82	1.70	1.66
Cc	1.00	1.07	1.05
Mf	4.38	4.19	4.28

**Nota:** Elaboración propia.

### Después de ser sometidas al desgaste en condición húmeda

Se tomaron 500g de arena del río Guamo y se humedecieron, como se muestra en la Figura 11 (c). Una vez humedecidas, se llevan al equipo Micro-Deval para el proceso de desgaste en los ciclos 3100, 4650 y 6200. Una vez terminado el ensayo, se procede a secar la muestra en el horno. Después de este proceso, se realiza el ensayo de granulometría, obteniendo los siguientes resultados.

**Tabla 8.**

*Granulometría de la arena del río Guamo en condición húmeda después del ensayo de Micro-Deval.*

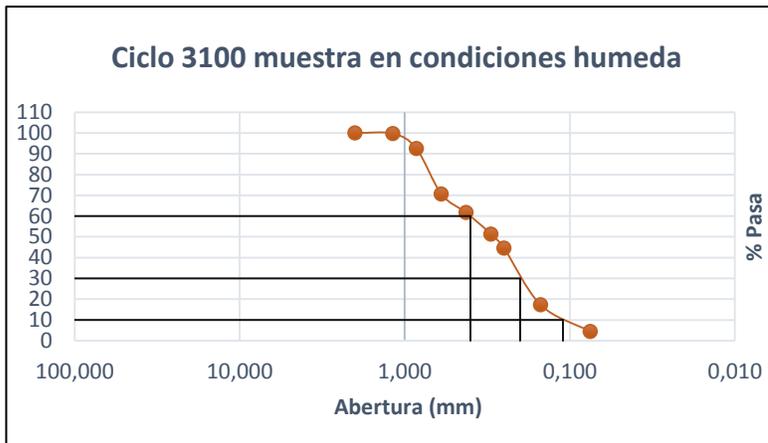
Tamiz		3100 húmeda		4650 húmeda		6200 húmeda	
Abertura		Porcentaje %		Porcentaje %		Porcentaje %	
N°	(mm)	Retenido	Pasa	Retenido	Pasa	Retenido	Pasa
10	2.000	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
16	1.180	0.30	99.70	0.49	99.51	1.31	98.69
20	0.850	7.23	92.47	10.67	88.83	16.00	82.69
30	0.600	21.87	70.61	17.55	71.29	25.29	57.40
40	0.425	8.96	61.65	7.13	64.16	11.67	45.73
50	0.300	10.29	51.36	6.96	57.20	8.28	37.45
60	0.250	6.83	44.52	4.21	52.99	2.97	34.48
100	0.150	27.31	17.22	23.02	29.97	16.06	18.42
200	0.075	12.85	4.37	21.10	8.87	14.08	4.34
	Fondo	4.37	0.00	8.87	0.00	4.34	0.00
<b>Total</b>		100.00		100.00		100.00	

**Nota:** Elaboración propia.

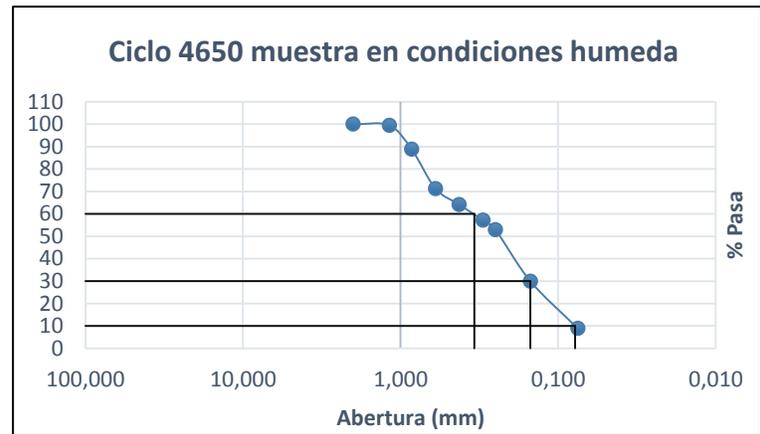
**Figura 19.**

*Curva granulométrica después del desgaste de cada ensayo de arena en condición húmeda*

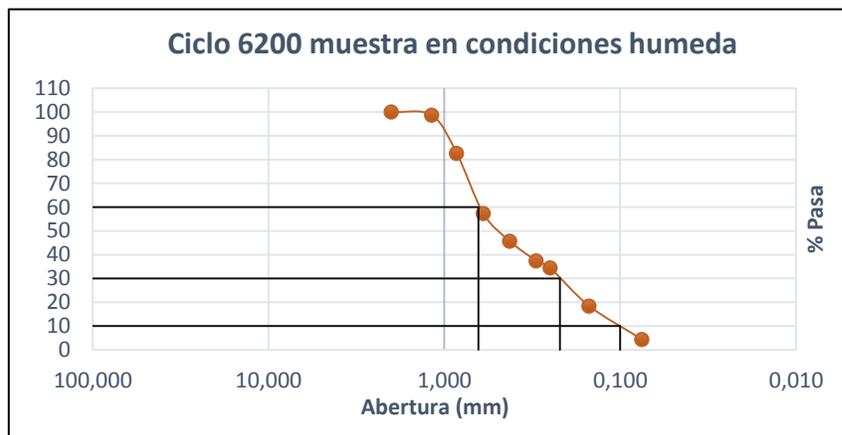
**a.**



**b.**



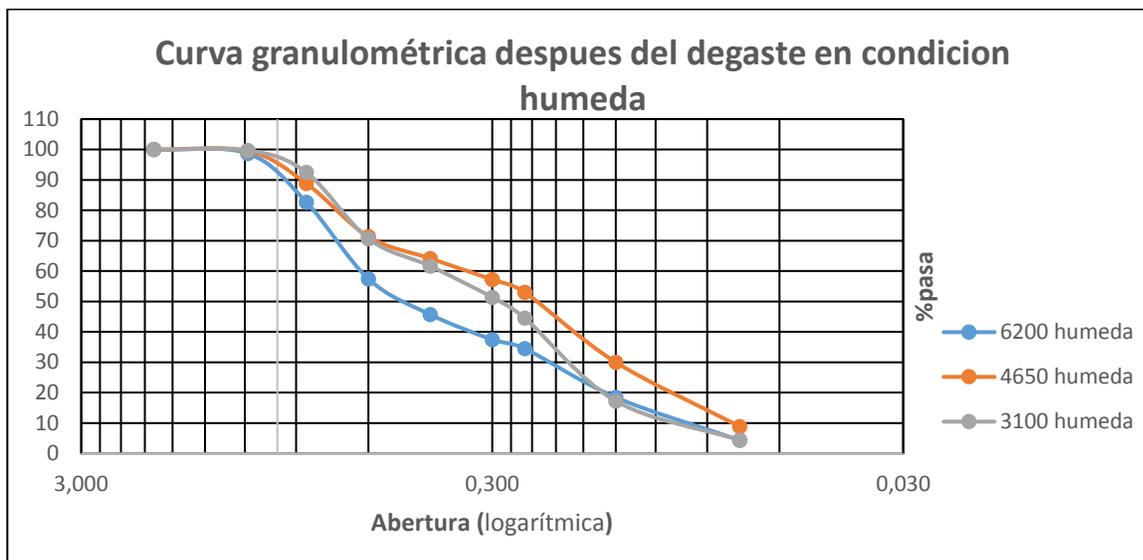
**c.**



**Nota** Se puede observar la curva granulométrica de cada ensayo hecho después del desgaste con arena en condición húmeda, y con sus respectivas líneas mostrándonos los diámetros efectivos d10, d30 y d60.

**Figura 20.**

Curva granulométrica de la arena del río Guamo en condición húmeda después del ensayo de Micro-Deval.



**Nota:** Se puede observar las gráficas de granulometría de los cinco ensayos antes del desgaste.

En la Tabla 9 se muestran los diámetros efectivos en mm de las muestras de arena después del ensayo en el equipo Micro-Deval con muestras de arena en condiciones húmedas. Estos diámetros se pueden observar en la Figura 20.

**Tabla 9.**

Diámetros efectivos para las muestras en condición húmeda después del desgaste

Diámetros efectivos	ciclos		
	3100	4650	6200
d10	1.29	1.20	1.26
d30	1.58	1.41	1.66
d60	2.51	2.19	4.37

**Nota:** Elaboración propia.

En la Tabla 10 se muestran los coeficientes de uniformidad, coeficiente de curvatura y módulo de finura para cada uno de los ensayos.

**Tabla 10.**

*Características de la curva granulométrica de la arena en condición húmeda después del desgaste*

Características	ciclos		
	3100	4650	6200
Cu	1.95	1.83	3.47
Cc	0.78	0.76	0.50
Mf	3.58	3.27	4.21

**Nota:** Elaboración propia.

### Desgaste Micro-Deval

Para evaluar el desgaste que sufren las muestras de arena del río Guamo a través del equipo Micro-Deval, se utiliza la ecuación 5, que nos dará el porcentaje de pérdida de cada ensayo como se evidencia en la Tabla 11 y Tabla 12, teniendo en cuenta su peso inicial y final en cada ensayo.

**Tabla 11.**

*Porcentaje de pérdida de la muestra húmeda*

Arena húmeda			
Ciclos	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Porcentaje de pérdida (%)
3100	500	451.07	9.79
4650	500	426.90	14.62
6200	500	433.86	13.23

**Nota:** Elaboración propia

**Tabla 12.**

*Porcentaje de pérdida de la muestra seca*

Arena seca			
Ciclos	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Porcentaje de pérdida (%)
3100	500	492.29	1.54
4650	500	496.73	0.65
6200	500	487.92	2.42

**Nota:** Elaboración propia.

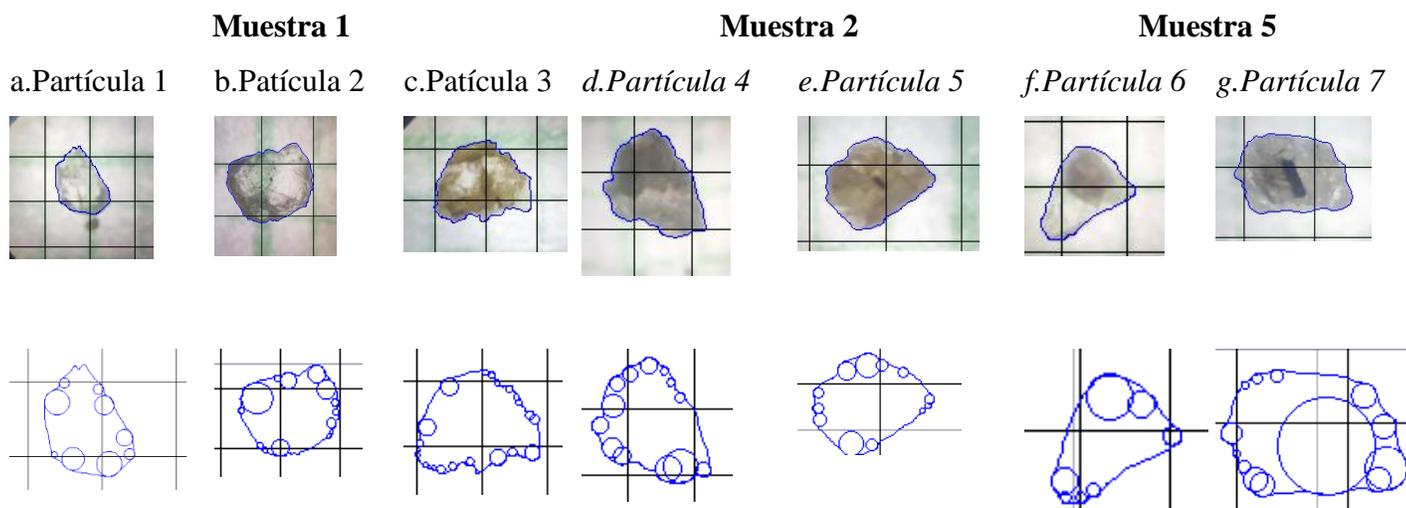
## Redondez y esfericidad

Para los cálculos de redondez y esfericidad se tienen en cuenta la ecuación 3 y 4, las cuales se desarrolla tomando las muestras antes de ser sometidas al desgaste y en cada ensayo experimental en los ciclos 3100, 4650 y 6200, para las muestras húmedas y secas, obteniendo digitalmente su forma geométrica, dando los siguientes valores de redondez y esfericidad.

### Cálculo de las partículas de arena antes del desgaste

**Figura 21.**

*Digitalización de partículas retenidas en el tamiz N°20 antes del desgaste*



**Nota:** Elaboración propia.

La Tabla 12 presenta los resultados de redondez, esfericidad y regularidad de las partículas retenidas en el tamiz N°20, tal como se visualiza en la Figura 30, antes de ser sometidas al desgaste.

**Tabla 13.**

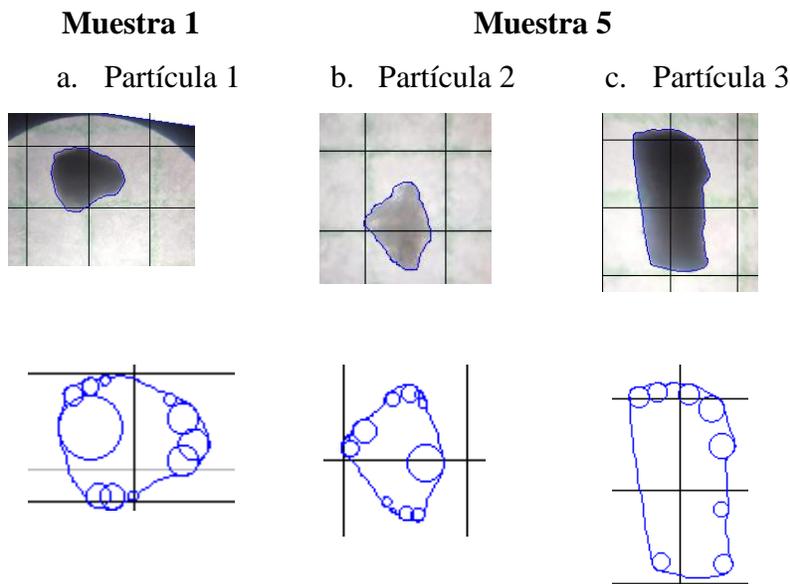
*Cálculos de redondez y esfericidad de las partículas retenidas en el tamiz N°20 antes del desgaste*

Partículas retenidas en tamiz N°20 antes del desgaste				
Ensayo	Partícula	Redondez	esfericidad	Regularidad
Muestra 1	1	0.2	0.6	0.42
	2	0.1	0.7	0.43
	3	0.1	0.7	0.37
Muestra 2	4	0.2	0.6	0.40
	5	0.2	0.7	0.41
Muestra 5	6	0.3	0.5	0.40
	7	0.2	0.6	0.41

**Nota:** elaboración propia

**Figura 22.**

*Digitalización de partículas retenidas en el tamiz N°40 antes del desgaste.*



**Nota:** Elaboración propia.

La Tabla 14 presenta los resultados de redondez, esfericidad y regularidad de las partículas retenidas en el tamiz N°40, tal como se visualiza en la Figura 31, antes de ser sometidas al desgaste.

**Tabla 14.**

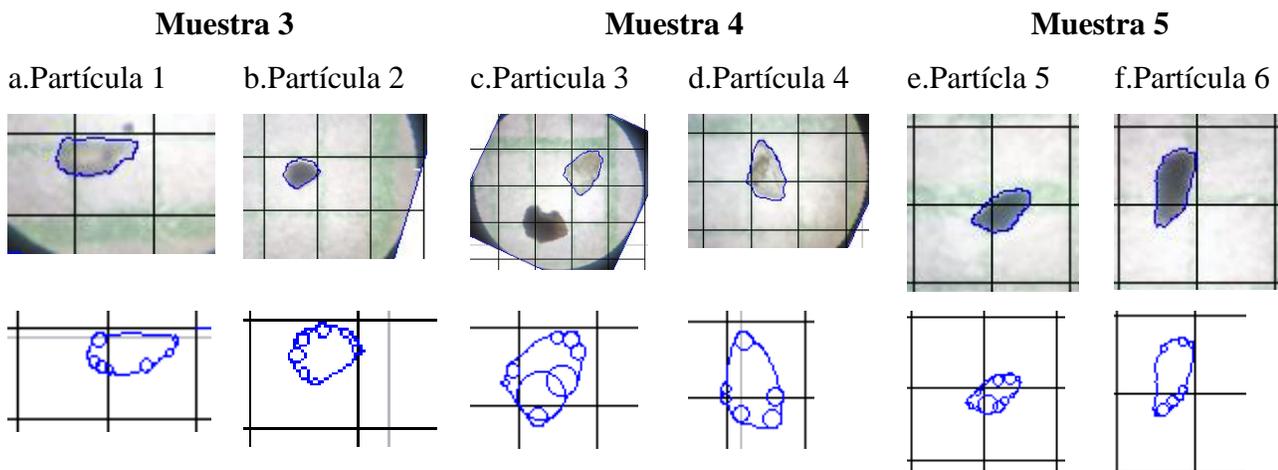
*Cálculos de redondez y esfericidad de las partículas retenidas en el tamiz N°40 antes del desgaste.*

Partículas retenidas en tamiz N°40 antes del desgaste				
Ensayo	Partícula	Redondez	esfericidad	Regularidad
Muestra 1	1	0.2	0.7	0.45
Muestra 5	2	0.2	0.6	0.38
	3	0.2	0.4	0.32

**Nota:** Elaboración propia

**Figura 23.**

*Digitalización de partículas retenidas en el tamiz N°60 antes del desgaste.*



**Nota:** Elaboración propia.

La Tabla 15 presenta los resultados de redondez, esfericidad y regularidad de las partículas retenidas en el tamiz N°60, tal como se visualiza en la Figura 32, antes de ser sometidas al desgaste.

**Tabla 15.**

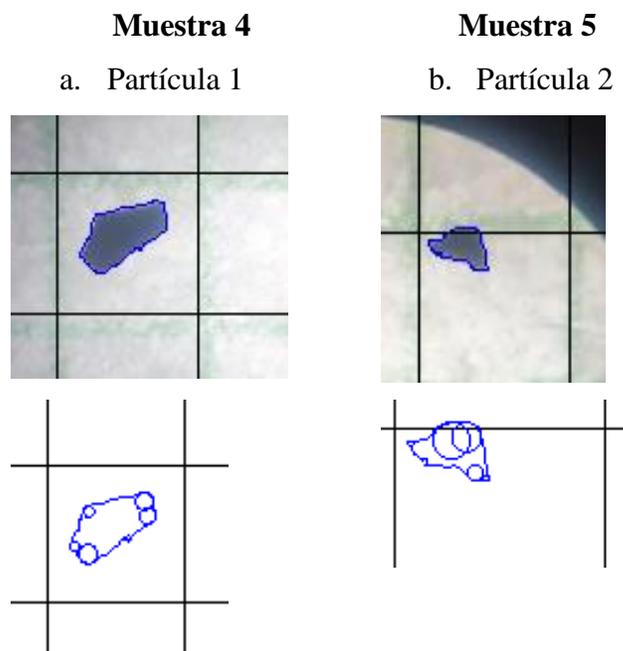
*Cálculos de redondez y esfericidad de las partículas retenidas en el tamiz N°60 antes del desgaste.*

Partículas retenidas en tamiz N°60 antes del desgaste				
Ensayo	partícula	Redondez	esfericidad	Regularidad
Muestra 3	1	0.2	0.4	0.33
	2	0.2	0.7	0.43
Muestra 4	3	0.3	0.6	0.45
	4	0.3	0.5	0.39
Muestra 5	5	0.2	0.5	0.36
	6	0.2	0.4	0.33

**Nota:** Elaboración propia

**Figura 24.**

*Digitalización de partículas retenidas en el tamiz N° 200 antes del desgaste.*



**Nota:** Elaboracion propia.

La Tabla 16 presenta los resultados de redondez, esfericidad y regularidad de las partículas retenidas en el tamiz N°200, tal como se visualiza en la Figura 33, antes de ser sometidas al desgaste.

**Tabla 16.**

*Cálculos de redondez y esfericidad de las partículas retenidas en el tamiz N° 200 antes del desgaste.*

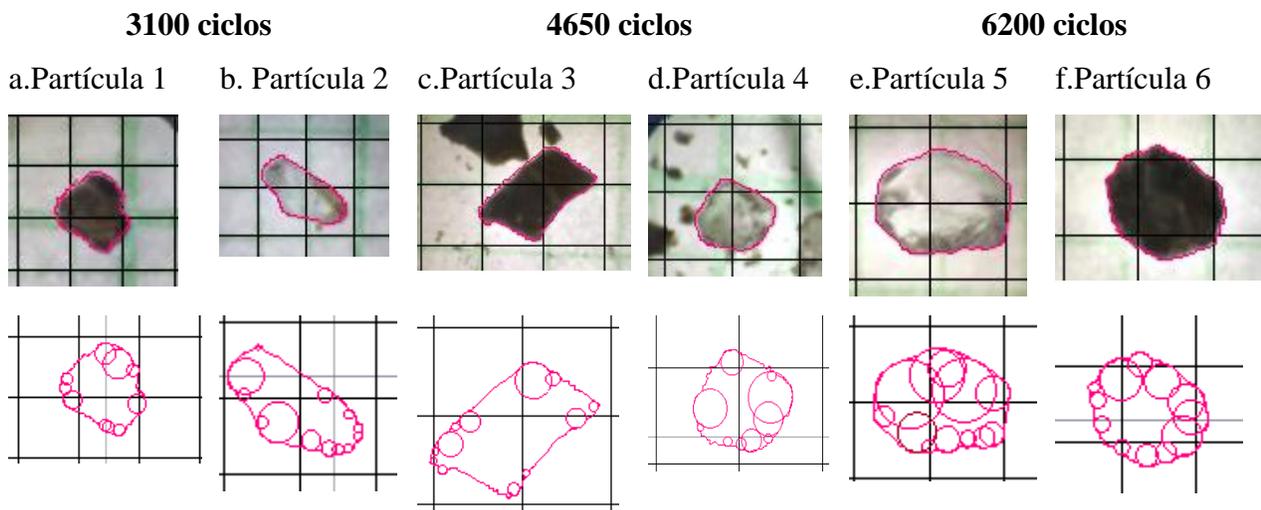
Partículas retenidas en tamiz N°200 antes del desgaste				
Ensayo	partícula	Redondez	esfericidad	Regularidad
Muestra 4	1	0.3	0.4	0.36
Muestra 5	2	0.3	0.5	0.40

**Nota:** Elaboración propia.

### Cálculo de las partículas húmedas después del desgaste

**Figura 25.**

*Digitalización de partículas húmedas retenidas en el tamiz N°20 después del desgaste.*



**Nota:** Elaboración propia

La Tabla 17 presenta los resultados de redondez, esfericidad y regularidad de las partículas retenidas en el tamiz N°20, tal como se visualiza en la Figura 34, después de ser sometidas al desgaste en condiciones húmedas.

**Tabla 17.**

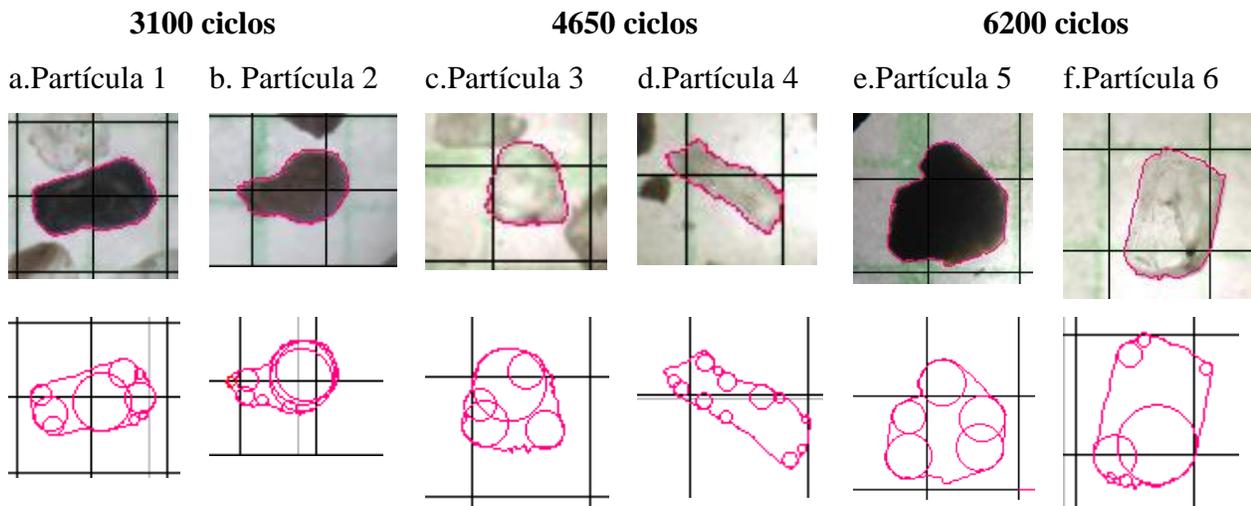
*Cálculos de redondez y esfericidad de las partículas húmedas retenidas en el tamiz N°20 después del desgaste.*

Partículas retenidas en tamiz N°20 después de desgaste húmedas				
Ciclos	partícula	Redondez	esfericidad	Regularidad
3100	1	0.3	0.7	0.47
	2	0.3	0.5	0.36
4650	3	0.3	0.5	0.39
	4	0.4	0.8	0.55
6200	5	0.4	0.7	0.53
	6	0.4	0.8	0.57

**Nota:** Elaboración propia.

**Figura 26.**

*Digitalización de partículas húmedas retenidas en el tamiz N° 40 después del desgaste*



**Nota:** Elaboración propia

La Tabla 18 presenta los resultados de redondez, esfericidad y regularidad de las partículas retenidas en el tamiz N°40, tal como se visualiza en la Figura 35, después de ser sometidas al desgaste en condiciones húmedas.

**Tabla 18.**

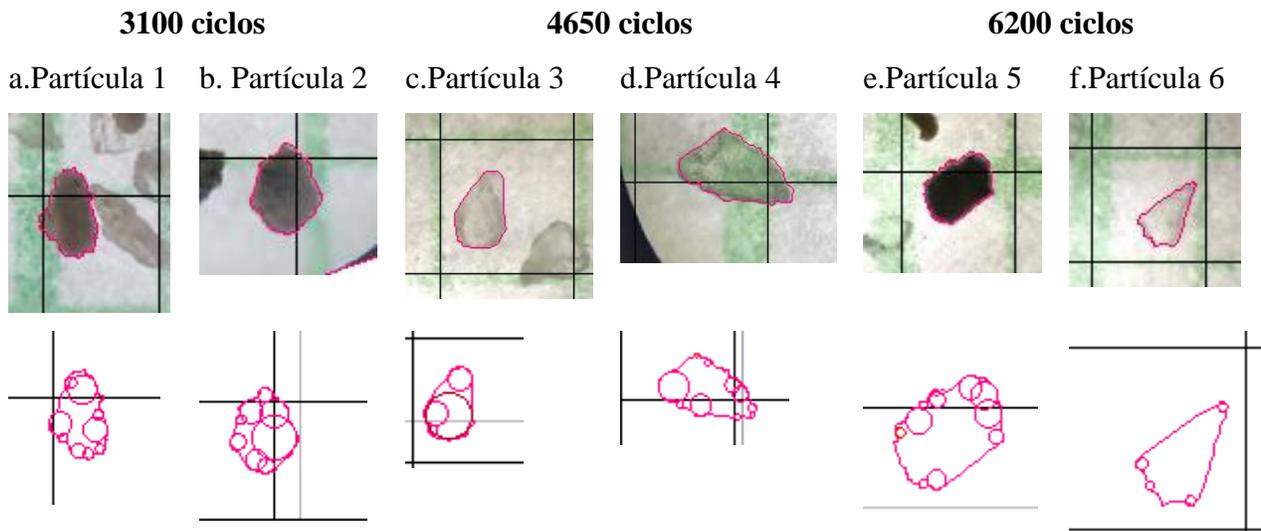
*Cálculos de redondez y esfericidad de las partículas húmedas retenidas en el tamiz N°40 después del desgaste.*

Partículas retenidas en tamiz N°40 después de desgaste húmedas				
Ciclos	partícula	Redondez	esfericidad	Regularidad
3100	1	0.4	0.5	0.44
	2	0.6	0.5	0.51
4650	3	0.5	0.7	0.6
	4	0.3	0.2	0.28
6200	5	0.5	0.7	0.57
	6	0.5	0.6	0.53

**Nota:** Elaboración propia.

**Figura 27.**

*Digitalización de partículas húmedas retenidas en el tamiz N°60 después del desgaste*



**Nota:** Elaboración propia.

La Tabla 19 presenta los resultados de redondez, esfericidad y regularidad de las partículas retenidas en el tamiz N°60, tal como se visualiza en la Figura 36, después de ser sometidas al desgaste en condiciones húmedas.

**Tabla 19.**

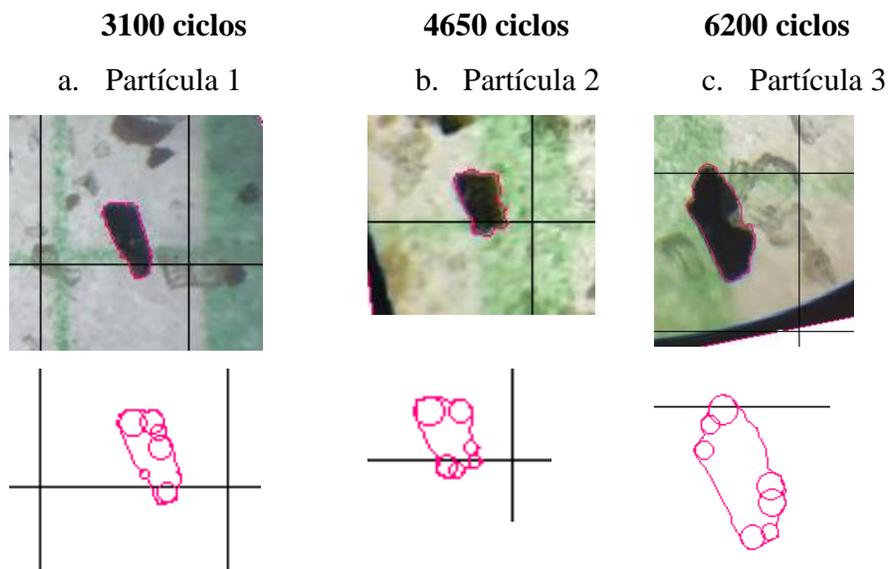
*Cálculos de redondez y esfericidad de las partículas húmedas retenidas en el tamiz N° 60 después del desgaste.*

Partículas retenidas en tamiz N°60 después de desgaste húmedas				
Ciclos	partícula	Redondez	esfericidad	Regularidad
3100	1	0.4	0.5	0.42
	2	0.4	0.6	0.51
4650	3	0.6	0.5	0.6
	4	0.2	0.6	0.40
6200	5	0.4	0.6	0.48
	6	0.2	0.4	0.30

**Nota:** Elaboración propia.

**Figura 28.**

*Digitalización de partículas húmedas retenidas en el tamiz N° 200 después del desgaste*



**Nota:** Elaboración propia.

La Tabla 20 presenta los resultados de redondez, esfericidad y regularidad de las partículas retenidas en el tamiz N°200, tal como se visualiza en la Figura 37, después de ser sometidas al desgaste en condiciones húmedas.

**Tabla 20.**

*Cálculos de redondez y esfericidad de las partículas húmedas retenidas en el tamiz N°200 después del desgaste.*

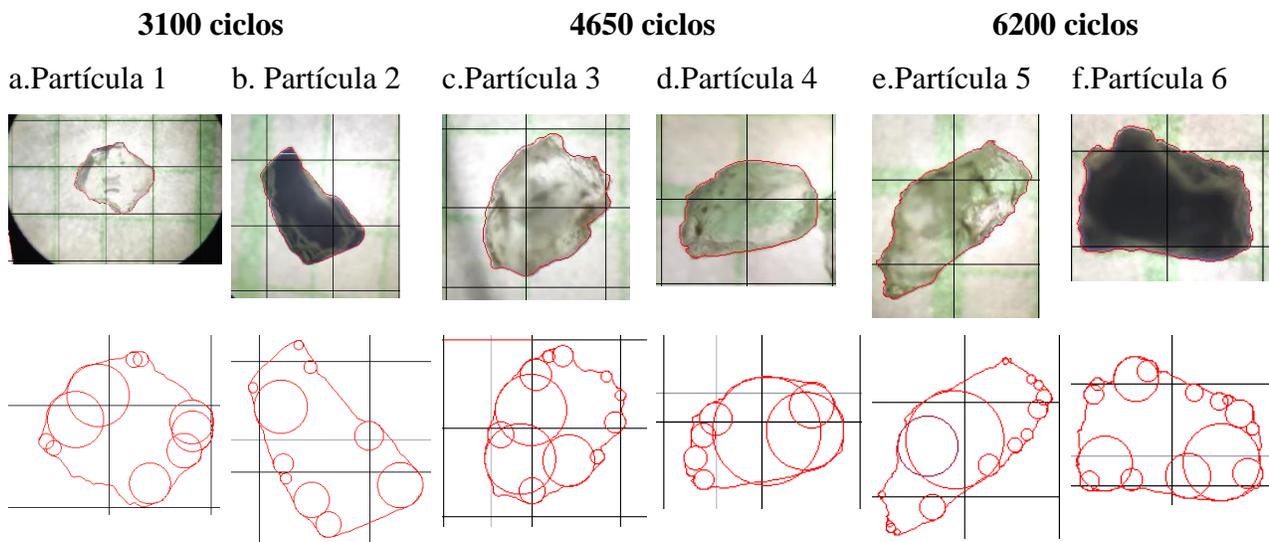
Partículas retenidas en tamiz N°200 después del desgaste húmeda				
Ciclos	Partícula	Redondez	Esfericidad	Regularidad
3100	1	0.5	0.4	0.44
4650	2	0.4	0.5	0.45
6200	3	0.4	0.3	0.38

**Nota:** Elaboración propia.

### Cálculo de las partículas secas después del desgaste

**Figura 29.**

*Digitalización de partículas secas retenidas en el tamiz N° 20 después del desgaste*



**Nota:** Elaboración propia.

La Tabla 21 presenta los resultados de redondez, esfericidad y regularidad de las partículas retenidas en el tamiz N°20, tal como se visualiza en la Figura 38, después de ser sometidas al desgaste en condiciones secas.

**Tabla 21.**

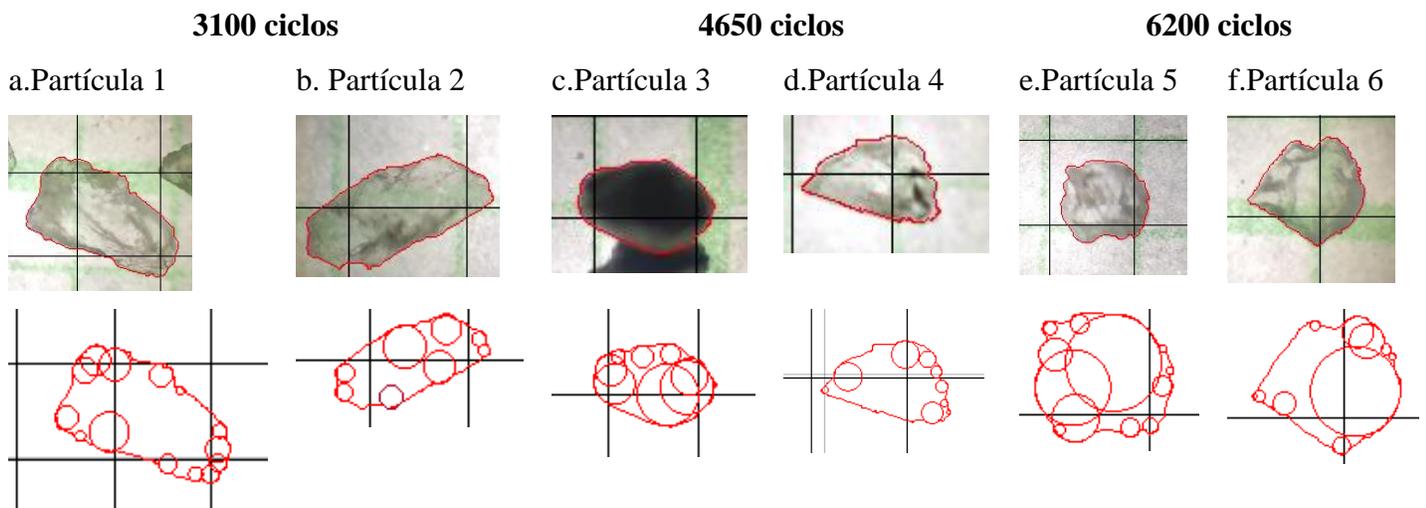
*Cálculos de redondez y esfericidad de las partículas secas retenidas en el tamiz N°20 después del desgaste.*

Partículas retenidas en tamiz N°20 después de desgaste secas				
Ciclos	Partícula	Redondez	Esfericidad	Regularidad
3100	1	0.2	0.7	0.46
	2	0.3	0.4	0.36
4650	3	0.3	0.7	0.47
	4	0.5	0.6	0.53
6200	5	0.2	0.4	0.31
	6	0.3	0.6	0.41

**Nota:** Elaboración propia

**Figura 30.**

*Digitalización de partículas secas retenidas en el tamiz N° 40 después del desgaste*



**Nota:** Elaboración propia.

La Tabla 22 *presenta* los resultados de redondez, esfericidad y regularidad de las partículas retenidas en el tamiz N°40, tal como se visualiza en la Figura 39, *después de ser sometidas al desgaste en condiciones secas.*

**Tabla 22.**

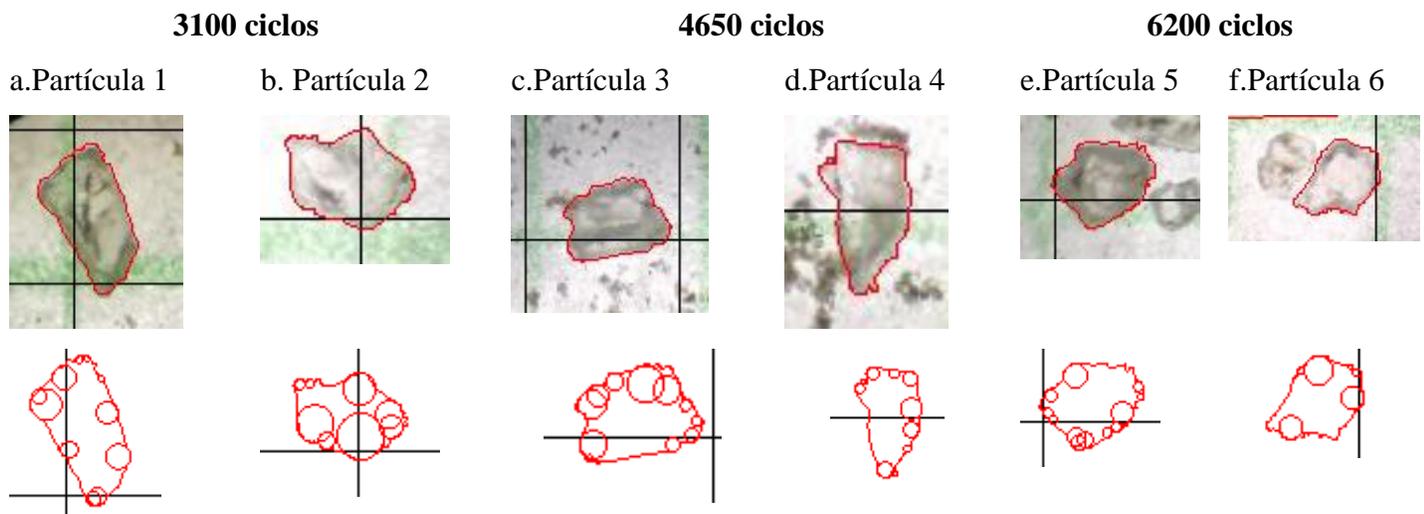
*Cálculos de redondez y esfericidad de las partículas secas retenidas en el tamiz N°40 después del desgaste.*

Partículas retenidas en tamiz N°40 después de desgaste seca				
Ciclos	Partícula	Redondez	Esfericidad	Regularidad
3100	1	0.3	0.4	0.35
	2	0.4	0.4	0.38
4650	3	0.5	0.6	0.54
	4	0.2	0.5	0.35
6200	5	0.3	0.7	0.50
	6	0.2	0.7	0.48

**Nota:** Elaboración propia

**Figura 31.**

*Digitalización de partículas secas retenidas en el tamiz N° 60 después del desgaste*



**Nota:** Elaboración propia

La Tabla 23 presenta los resultados de redondez, esfericidad y regularidad de las partículas retenidas en el tamiz N°60, tal como se visualiza en la Figura 40, después de ser sometidas al desgaste en condiciones secas.

**Tabla 23.**

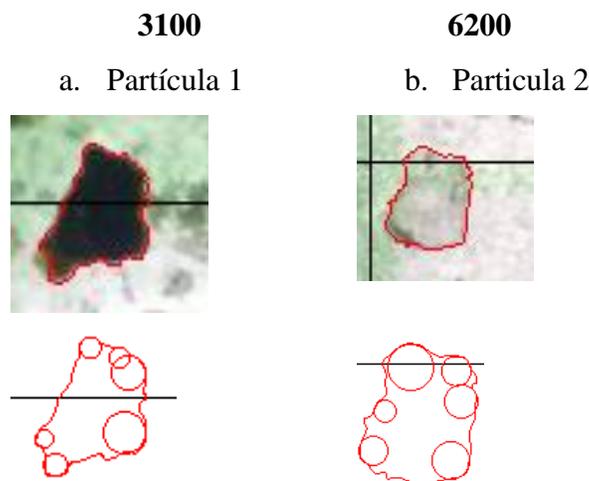
*Cálculos de redondez y esfericidad de las partículas secas retenidas en el tamiz N° 60 después del desgaste.*

Partículas retenidas en tamiz N° 60 después de desgaste seca				
Ciclos	Partícula	Redondez	Esfericidad	Regularidad
3100	1	0.3	0.4	0.34
	2	0.4	0.6	0.49
4650	3	0.3	0.4	0.4
	4	0.2	0.6	0.43
6200	5	0.2	0.7	0.43
	6	0.2	0.6	0.42

**Nota:** Elaboración propia

**Figura 32.**

*Digitalización partículas secas retenidas en el tamiz N° 200 después del desgaste*



**Nota:** Elaboración propia

La Tabla 24 presenta los resultados de redondez, esfericidad y regularidad de las partículas retenidas en el tamiz N°200, tal como se visualiza en la Figura 41, después de ser sometidas al desgaste en condiciones secas.

**Tabla 24.**

*Cálculos de redondez y esfericidad de las partículas secas retenidas en el tamiz N° 200 después del desgaste.*

Partículas retenidas en tamiz N° 200 después del desgaste seca				
Ciclos	Partícula	Redondez	Esfericidad	Regularidad
3100	1	0.4	0.5	0.41
6200	2	0.4	0.6	0.49

**Nota:** Elaboración propia

### **Análisis de resultados**

El presente capítulo se describe la implementación de las etapas metodológicas propuestas. Para obtener los datos cuantitativos necesarios para la investigación, se realizaron diversos ensayos de laboratorio experimentales que ayudan a comprender el comportamiento físico de la Arena del Guamo.

#### **Análisis granulométrico**

En primer lugar, se realizó la granulometría de la arena del Río Guamo a cada una de las muestras antes de ser sometidas al desgaste a través del Micro-deval. El análisis granulométrico de un agregado según (CAÑAS, 2007), es un procedimiento que permite determinar la distribución de los tamaños de las partículas que lo componen. Para ello, se utilizó una serie de tamices con aberturas de diferentes tamaños: N°10, 16, 20, 30, 40, 50, 60, 100 y 200.

En los análisis granulométricos, las partículas que pasan a través de un tamiz se consideran más pequeñas que las retenidas. Se observó en la Tabla 2 las diferencias en la distribución de tamaños. En la Tabla 2 de las partículas antes de que sea sometidas al desgaste se puede observar que en el tamiz N°20 retuvo un mayor porcentaje de partículas en comparación con los ensayos de granulometría de las partículas desgastadas.

Las Tablas 5 y 8 indican un desgaste en las muestras después del ensayo Micro-Deval. En condiciones secas, el tamiz N°50 retuvo la mayor cantidad de material, mientras que, en condiciones húmedas, fue el tamiz N°100. Se observa claramente que la muestra en condiciones húmedas experimenta un desgaste más significativo en comparación con la muestra en condiciones

secas. Hubo una excepción en el ciclo de 6200, donde el tamiz N°30 retuvo más material, posiblemente debido a un error humano por falta de agitación en el ensayo granulométrico.

De acuerdo con (Ovalle,2014), un coeficiente de uniformidad por debajo de 4 indica un material mal gradado. Los resultados en la Tabla 4 revelan que la muestra de arena del río Guamo antes del desgaste muestra una uniformidad cercana a 2, lo que indica que es un material mal gradado. Esta tendencia se mantiene en los ensayos con muestras en condiciones secas y húmedas, como se muestra en las Tablas 7 y 10, donde los coeficientes de uniformidad siguen indicando que el material es mal gradado debido a su composición uniforme. Además, según el estudio de (David, 2016), los valores del módulo de finura clasifican esta arena como arena gruesa, ya que superan el umbral de 3.1. Esta clasificación se mantiene en los ensayos con muestras en condiciones secas y húmedas, ya que los valores continúan siendo mayores que 3.1. Es importante destacar que se observan variaciones entre las muestras antes y después del desgaste, indicando cambios en la distribución de tamaños de partículas.

#### **Análisis redondez y esfericidad.**

Analizando los resultados obtenidos, se evidencia el desgaste de la arena en los tres ciclos simulados en el Micro-deval, tanto en condiciones secas como en húmedas. Con los resultados experimentales es posible afirmar que, las partículas van reduciendo su tamaño. Además, en condiciones de humedad, el desgaste es mayor, puesto que el agua actúa como lubricante, permitiendo que las partículas se muevan entre sí más fácilmente, aumentando la fuerza de fricción, produciendo un desgaste más rápido.

Adentrándonos en el estudio de suelos granulares, podemos observar diversas investigaciones que han demostrado que la forma de las partículas de los agregados finos tiene un impacto importante en la ingeniería civil (Holubec & D'Appolonia, s. f.), (Ma et al, 2023). Para aplicar este conocimiento a la ingeniería geotécnica, es necesario cuantificar la forma de las partículas del suelo.

La esfericidad desde el punto de vista de (Rorato et al, 2019) es una medida de similitud de la forma de un grano con la de una esfera; es un parámetro importante en sedimentología, donde se utiliza para caracterizar la forma de las partículas de sedimento. En los últimos años, la esfericidad

también ha ganado importancia en el modelado de elementos discretos de materiales granulares. Después del desgaste inducido con el Micro-deval, se pudo observar una reducción en el tamaño de la partícula por pérdida de masa, generando una forma menos esférica.

Respecto a la redondez de las partículas, se midió con el índice de redondez de Krumbein y Sloss (Krumbein & Sloss, 1951). Este índice se basa en la relación entre el diámetro mayor y el diámetro menor de una partícula. Las partículas redondeadas tienen una forma uniforme y suave, mientras que las partículas angulares tienen una forma más irregular y con esquinas afiladas, este fue el caso de la muestra húmeda de la Figura 36, partícula 6 (f), la cual fue sometida a un ciclo de 6200. En las muestras después del desgaste se hace evidente de manera contundente el cambio de geometría, la partícula se vuelve más redonda a medida que se desgasta, debido a que se tienden a eliminar las esquinas y los bordes afilados, lo que hace que la partícula sea más lisa, redonda y sufra una deformación por pérdida de masa.

Los resultados obtenidos revelan un cambio sustancial en la esfericidad y la redondez como consecuencia del desgaste. Tras someter las partículas al proceso de desgaste, se observó una transformación significativa en su forma, la esfericidad y redondez de las partículas antes y después del desgaste. Los cambios en estas propiedades pueden influir en la capacidad de las partículas para compactarse y contribuir al comportamiento físico del material, ya que la resistencia del material no va a ser igual. Las partículas de forma uniforme y regular tienden a mostrar un comportamiento físico más favorable en comparación con aquellas de forma irregular (Xie et al, 2020).

### Conclusiones

1. Los ensayos en el equipo Micro-Deval con muestras de arena del río Guamo en condiciones secas y húmedas mostraron que el desgaste provoca cambios morfológicos significativos en las partículas. Estos cambios se evidencian en las características geométricas de las partículas, tanto antes como después del ensayo.
2. Se pudo identificar tras el desgaste una variación significativa en la esfericidad y redondez de las partículas como se puede observar en la Tabla 13 y 17. Este cambio tiende a que las partículas adquieran formas menos uniformes. A través de los ensayos elaborados en la investigación se pudo observar de manera detallada las propiedades morfológicas de las partículas de la muestra de arena del río Guamo antes y después del desgaste.
3. La comparación de los resultados de las muestras de arena antes y después del desgaste, permite determinar que los cambios morfológicos que sufrieron las partículas después del desgaste, donde se vuelven más lisas y redondas, afectando el comportamiento físico de los materiales.
4. Esta investigación es relevante para la ingeniería, ya que la calidad de los materiales granulares desempeñan un papel importante en la durabilidad de las estructuras. Es importante comprender como el desgaste afecta las partículas para seleccionar adecuadamente los materiales para proyectos de infraestructura.

## Recomendaciones

1. Se recomienda para futuras investigaciones, guardar las muestras en lugares seguros para evitar su pérdida. Esto fue una limitante en el presente estudio, ya que no se pudo tomar la fotomicrografía de todas las muestras antes del desgaste debido a la pérdida de algunas de ellas.
2. Para tomar fotomicrografías después del desgaste, se recomienda utilizar un microscopio con mayor resolución para poder observar con mayor detalle las partículas retenidas en los tamices de menor abertura.
3. Para evitar la pérdida de material, se recomienda contar con herramientas adecuadas de limpieza después del desarrollo del ensayo Micro-Deval y granulométrico. Además, se recomienda contar con equipos calibrados para un mejor resultado.
4. Se recomienda para futuras investigaciones realizar ensayos de desgaste con diferentes parámetros, como la carga, el número de ciclos y la humedad.

### Referencias

- Arasan, S., Akbulut, S., & Hasiloglu, A. S. (2011). The relationship between the fractal dimension and shape properties of particles. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(7), 1219-1225. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-1310-x>.
- Araújo, S. A. de, Pessota, J. H., & Kim, H. Y. (2015). Beans quality inspection using correlation-based granulometry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 40, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.01.004>.
- Arena Del Guamo Colombia | PDF | Roca (geología) | Minerales*. (s. f.). Recuperado 22 de noviembre de 2023, de <https://es.scribd.com/document/222401821/Arena-Del-Guamo-Colombia>
- ASTM. (2003). Métodos de prueba estándar de agregados finos (según la influencia de las partículas, la textura de la superficie y la clasificación (1252-03).
- ASTM. (2008). Standard test method for resistance of fine aggregate to degradation by abrasion in the Micro-Deval apparatus.
- Carmona Álvarez, J. E. (2019). *Análisis de la compacidad relativa en la construcción de muestras de arena usando técnicas experimentales de pluviación y modelamientos con el método de elementos discretos (DEM)*. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/24433>.
- Cardenas Ramirez, L. A., & Moya Ortiz, A. J. (2022). Análisis granulométrico de agregados grueso y fino. <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/47187>
- Cho, G.-C., Dodds, J., & Santamarina, J. (2006). Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. *Journal of Geotechnical and*

- Geoenvironmental Engineering*, 132, 591-602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:5\(591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591)).
- Chen, Q., Zhou, Z., Cai, S., Lv, M., Yang, Y., Luo, Y., Jiang, H., Liu, R., Cao, T., Yao, B., Chen, Y., Li, Q., Zeng, X., Ye, R., Fang, Y., Pan, Y., He, W., Pang, L., He, H., ... Tian, X. (2024). Spatial-temporal variation of soil organic matter decomposition potential in China. *Soil and Tillage Research*, 235, 105898. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105898>
- Cruz, O. D. la, & Luis, J. (2013). Influencia de la energía de compactación en el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca en los suelos granulares. Universidad Nacional de Cajamarca. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/687>
- David, C. S. L. (2016). EFECTO DE LA REDONDEZ DE LA ARENA SOBRE EL DESGASTE ABRASIVO A 3 CUERPOS SEGÚN LA NORMA ASTM G65. Equipo Micro-Deval | Pinzuar—Equipos de Laboratorio para la Industria de la Construcción en Colombia. (s. f.). Recuperado 22 de noviembre de 2023, de <https://www.pinzuar.com.co/product/188>
- Fonseca, J., O'Sullivan, C., Coop, M. R., & Lee, P. D. (2012). Non-invasive characterization of particle morphology of natural sands. *Soils and Foundations*, 52(4), 712-722. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.07.011>.
- Forsström, D., & Jonsén, P. (2016). Calibration and validation of a large scale abrasive wear model by coupling DEM-FEM: Local failure prediction from abrasive wear of tipper bodies during unloading of granular material. *Engineering Failure Analysis*, 66, 274-283. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.04.007>

- Garcia, J. A., & Alonso, P. J. (2006). Efectos del desgaste en las propiedades geotécnicas de las arenas [Revista]. <http://seags.ait.asia/seags-agssea-journal-2020-2022-issues/seags-agssea-journal-june-2022/>
- Gerasimova, M., & Konyushkov, D. (2023). History and principles of soil classification. En M. J. Goss & M. Oliver (Eds.), *Encyclopedia of Soils in the Environment (Second Edition)* (pp. 185-196). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00133-6>
- Google Earth. (2023). <https://earth.google.com/web/search/rio+del+g/@5.06217678,-74.8836778,301.89173602a,12582.97703093d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCV2UQ22t3xZAEf0SqOWRpQNAGd-KUnqv-1HAIekkdTWlqVPA>
- Holubec, I., & D'Appolonia, E. (s. f.). Effect of Particle Shape on the Engineering Properties of Granular Soils. Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils, 304-318. <https://doi.org/10.1520/STP37879S>
- INVIAS. (2012). DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL AGREGADO FINO A LA DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN, UTILIZANDO EL APARATO MICRO-DEVAL (245-13). <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-245-13.pdf>
- INVIAS. (2007). ANALISIS GRANULOMETRICO DE SUELOS POR TAMIZADO (123-07).
- INVIAS. (2013). RELACIONES DE PESO UNITARIO-HUMEDAD EN LOS SUELOSCOMPACTACION PROCTOR ESTANDAR (142).
- Kim, B.-S., Sakakibara, T., Park, S.-W., & Kato, S. (2021). Effects of Grain Shape on Mechanical Behavior of Granular Materials Using DEM Analysis. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(6), 1939-1950. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0582-z>.
- Kölbl, A., von Lützwow, M., & Kögel-Knabner, I. (2006). Decomposition and distribution of 15N labelled mustard litter (*Sinapis alba*) in physical soil fractions of a cropland with high-

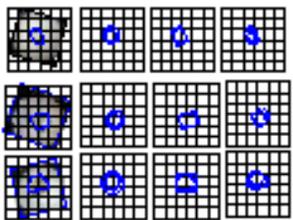
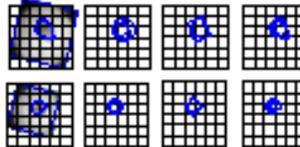
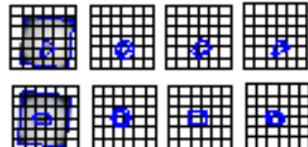
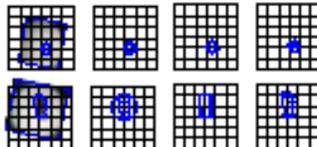
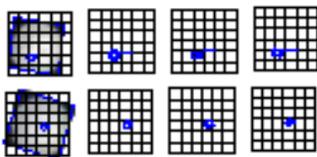
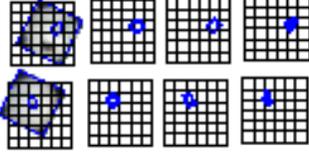
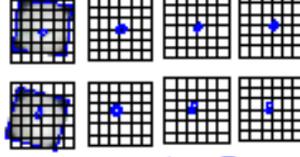
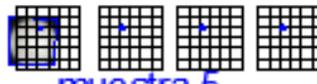
- and low-yield field areas. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(11), 3292-3302.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.04.010>
- López, J. M., & Buey, C. de S. de. (2010). Aplicación del método de descriptores de Fourier a la clasificación morfológica de partículas en materiales geológicos. *Revista Digital del Cedex*, 157, Article 157.
- López, E. J. (2004). Estudio experiemental del desgaste abrasivo en aceros AISI 8620, D-2 y H-13con y sin tratamiento superficial.
- Ma, C., Zhu, C., Qu, R., Liu, H., & Wang, T. (2023). Influence of the particle morphology and internal porosity characteristics of coral sand in the South China Sea on its limit void ratio. *Powder Technology*, 428, 118771. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118771>.
- Manual aparato Micro Deval Ref PA-64 by Publicidad Pinzuar—Issuu. (2014, octubre 16).  
[https://issuu.com/pinzuar/docs/web\\_ref\\_pa-64\\_manual\\_aparato\\_micro\\_](https://issuu.com/pinzuar/docs/web_ref_pa-64_manual_aparato_micro_)
- Onyelowe, K. C., Ebid, A. M., Ramani Sujatha, E., Fazel-Mojtahedi, F., Golaghaei-Darzi, A., Kontoni, D.-P. N., & Nooralddin-Othman, N. (2023). Extensive overview of soil constitutive relations and applications for geotechnical engineering problems. *Heliyon*, 9(3), e14465. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14465>
- Riquetti, N. B., Beskow, S., Guo, L., & Mello, C. R. (2023). Soil erosion assessment in the Amazon basin in the last 60 years of deforestation. *Environmental Research*, 236, 116846. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116846>
- Rorato, R., Arroyo, M., Andò, E., & Gens, A. (2019). Sphericity measures of sand grains. *Engineering Geology*, 254, 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.04.006>

- Seguel S., O., & Orellana S., I. (2008). RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE SUELOS Y LOS PROCESOS DE GÉNESIS E INTENSIDAD DE USO. *Agro Sur*, 36(2), 82-92. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2008.v36n2-04>
- Vallejo, L. E., & Zhou, Y. (1995). The Relationship Between the Fractal Dimension and Krumbein's Roundness Number. *Soils and Foundations*, 35(1), 163-167. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.35.163>
- Villalaz, C. C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Mexico: Limusa Noriega editors
- Vargas, Juan camilo Cordero, Jhon Sebastian Manrique Paredes, y Oscar David Moreno Quijano. «Influencia de las características físicas en el comportamiento mecánico de los suelos granulares». *INVENTUM* 17, n.o 32 (25 de julio de 2022): 57-67. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.17.32.2022.57-67>.
- Vangla, P., & Latha, G. M. (2015). Influence of Particle Size on the Friction and Interfacial Shear Strength of Sands of Similar Morphology. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(1). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s40891-014-0008-9>
- Widder, L., Rojacz, H., Adam, K., Kuttner, A., & Varga, M. (2023). Abrasive wear protection in material handling: Mechanism-based combination of lab-experiments for optimal material selection. *Wear*, 530-531, 204979. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204979>
- Xie, W.-Q., Zhang, X.-P., Yang, X.-M., Liu, Q.-S., Tang, S.-H., & Tu, X.-B. (2020). 3D size and shape characterization of natural sand particles using 2D image analysis. *Engineering Geology*, 279, 105915. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105915>
- Yaseen, G., Alaloul, W. S., Hafeez, I., & Qureshi, A. H. (2021). Shape characterizing of aggregates produced through different crushing techniques. *Coatings*, 11(10). Scopus. <https://doi.org/10.3390/coatings11101199>

Zhang, T., Zhang, C., Yang, Q., & Fu, R. (2020). Inter-particle friction and particle sphericity effects on isotropic compression behavior in real-shaped sand assemblies. *Computers and Geotechnics*, 126, 103741. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103741>

Zhang, X., Zhong, C., Huang, T., & Ji, T. (2018). Method of Image Analysis of Aggregate ParticleGroup Based on Gray Morphological Reconstruction. *Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials*, 21(6), 886-891 and 905. Scopus. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2018.06.005>

## Anexo 1

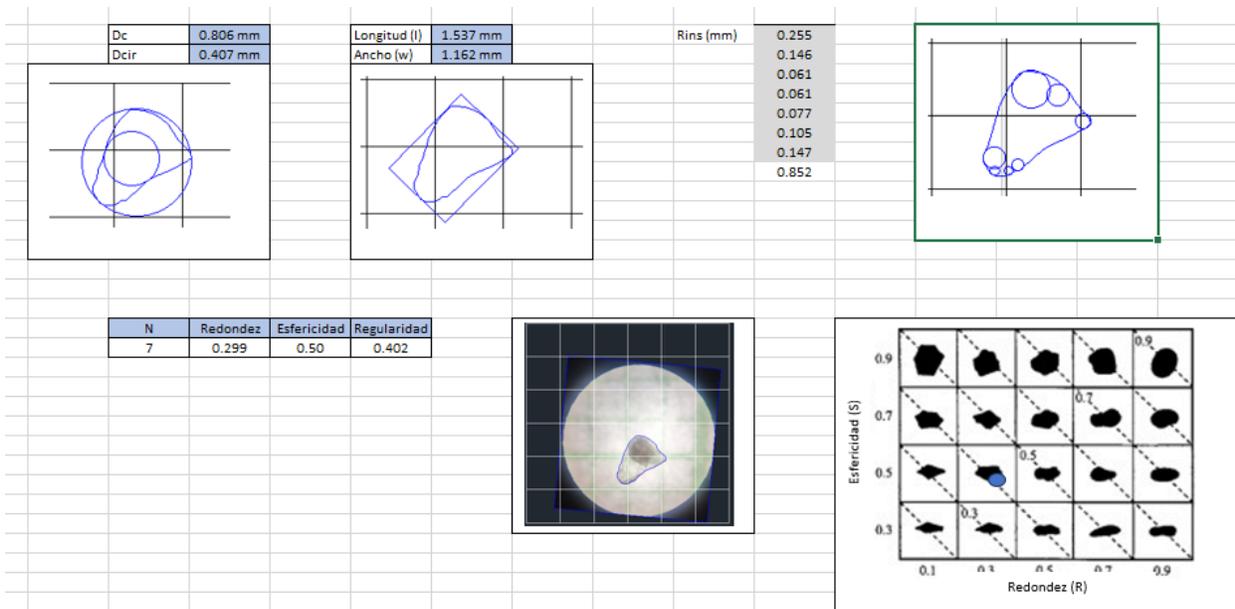
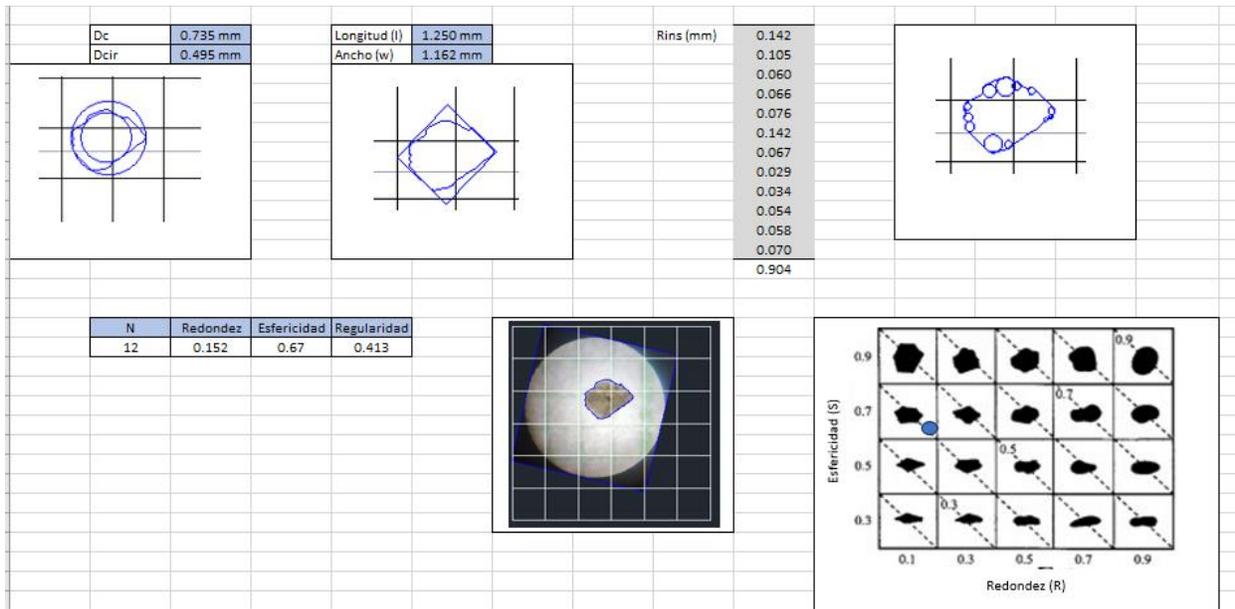
	Antes del desgaste		
0.850 mm	muestra 1 	muestra 2 	muestra 5 
0.425 mm	muestra 1 	muestra 5 	
0.250 mm			
0.075 mm			

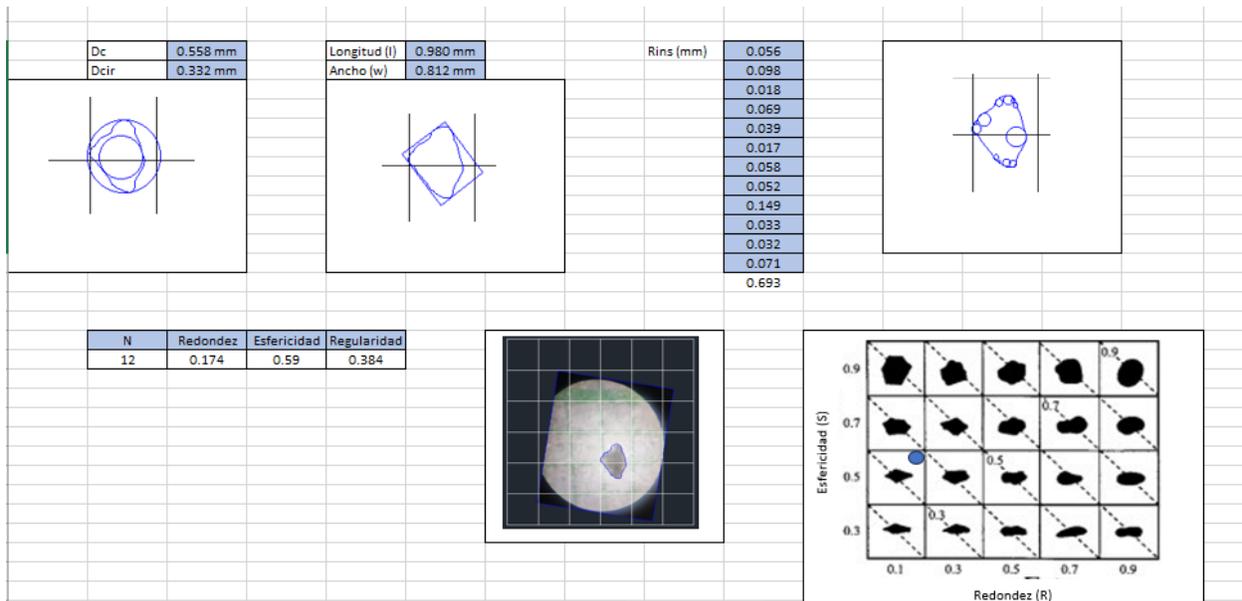
		Arena humeda											
		3100				4650				6200			
0.850 mm													
													
0.425 mm													
													
0.250 mm													
													
0.075 mm													
													

		Arena seca											
		3100				4650				6200			
0.850 mm													
													
0.425 mm													
													
0.250 mm													
													
0.075 mm													
													

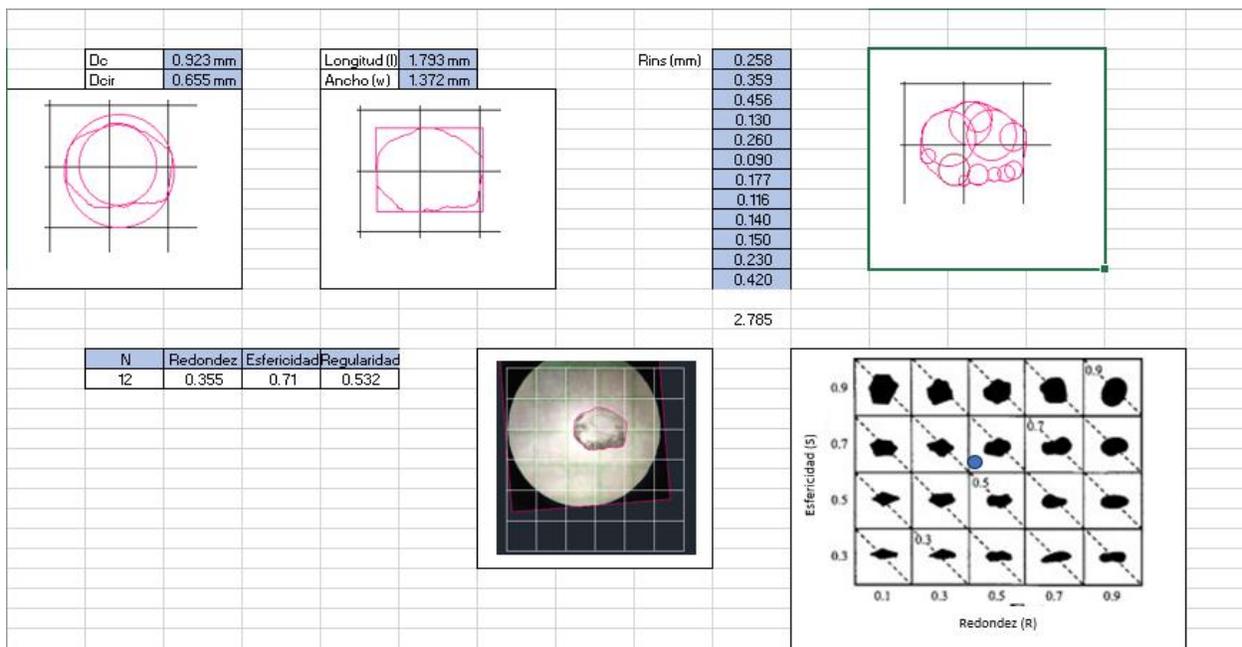
## Anexo 2

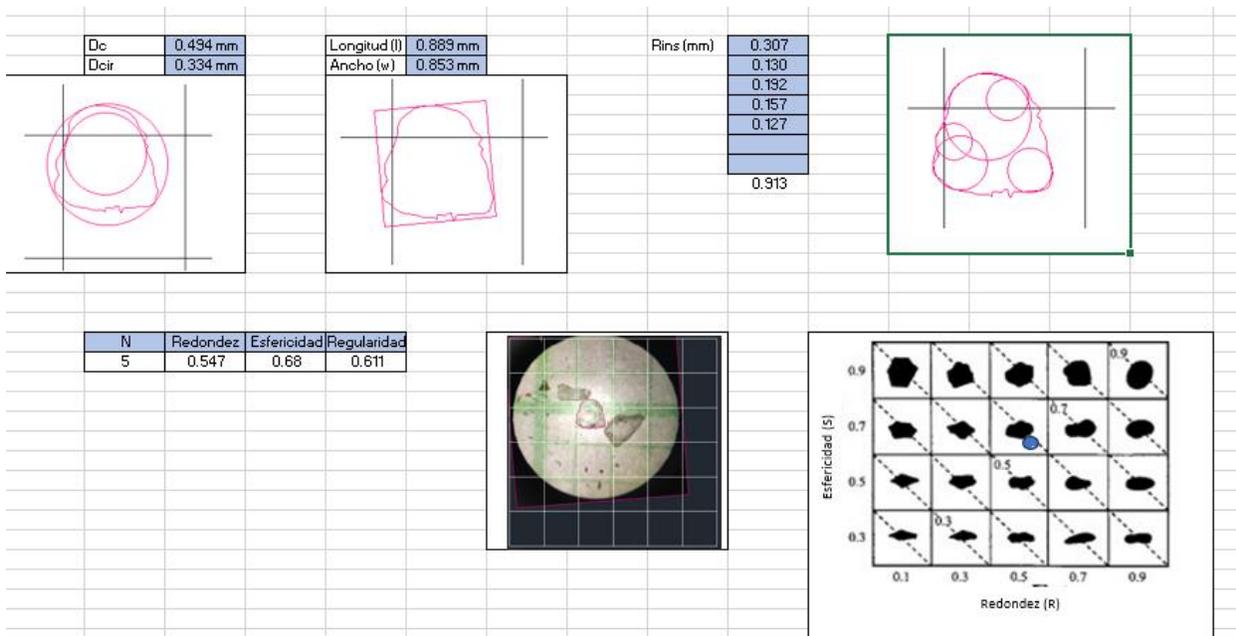
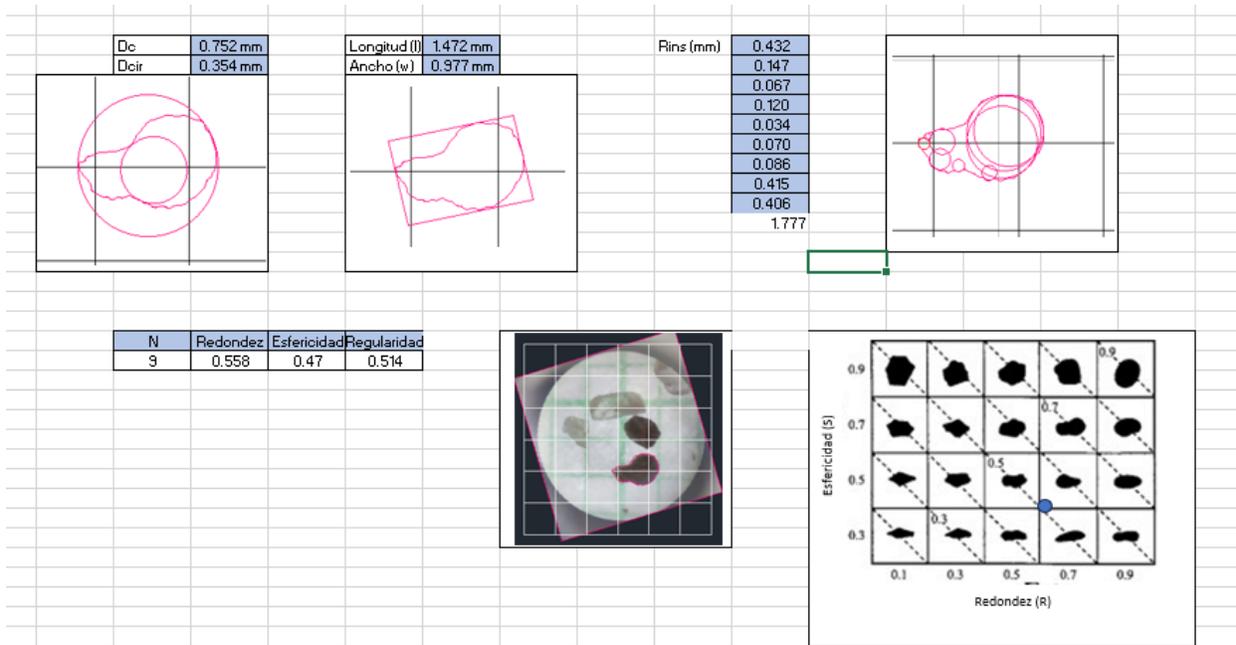
### Antes del desgaste





## Después del desgaste muestra en condiciones húmedas





## Después del desgaste muestra en condiciones secas

